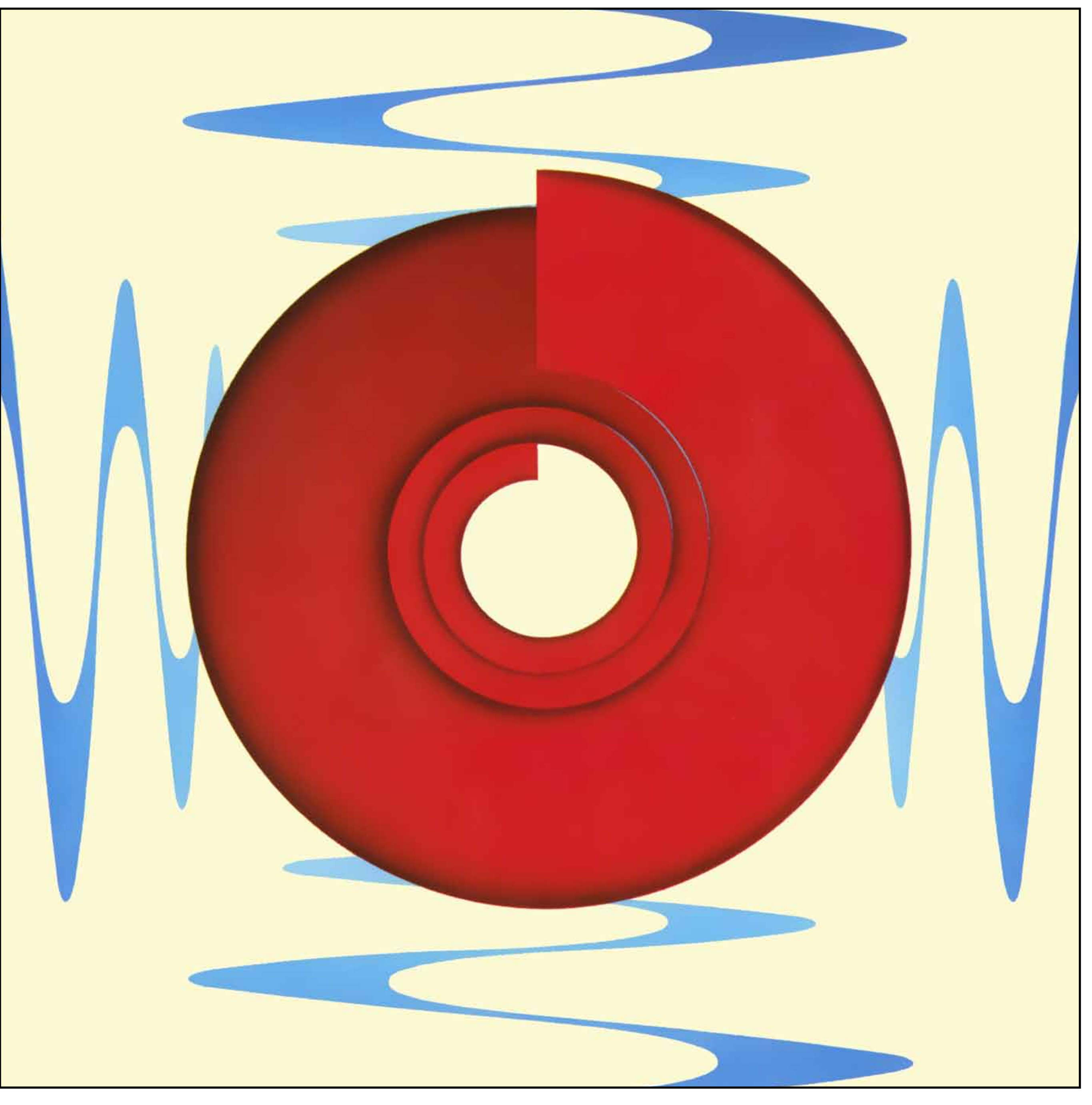
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



LUZ COMPRIMIDA

Julio 1988

450 PTAS.

Apuntes

Comienzan a aparecer en Europa los resultados de estudios sistemáticos sobre las consecuencias del desastre de Chernobyl. Así, por ejemplo, los trabajos realizados en el norte de Italia señalan que, de acuerdo con el contenido en los isótopos 134 y 137 del cesio en macromicetes, la contaminación fue superior en los hongos con el micelio superficial que en los que se hallaban en simbiosis con las raíces de los árboles. O lo que es lo mismo: parece haber una relación directa entre contaminación y características del suelo.

Representantes de 16 naciones adscritas a la Oficina Espacial Europea han puesto las bases para una ''expedición al planeta Tierra'', como proyecto nuclear del Año Internacional del Espacio correspondiente a 1992. Avalan ese propósito la amenaza que se cierne sobre nuestro medio y la necesidad de entender el cambio general que está atravesando el planeta.

Pruebas indirectas —piedras trabajadas, deposición no fortuita de restos óseos y conchas recolectadas— obtenidas en las excavaciones del acantilado chipriota del Aguila denuncian la instalación del hombre pleistocénico en esa isla del Mediterráneo hace ya unos 10.000 años.

La desaparición de las masas forestales en los países del Tercer Mundo no obedece sólo a la roturación con fines agrícolas o a la combustión de la madera como fuente de energía, sino también, y de manera principal, a una política económica alicorta de gestión de los bosques. Así lo afirma el Instituto sobre Recursos Mundiales en su informe de este año.

La política parece tener la culpa también del escaso interés que está recibiendo la biotecnología y su capacidad para el control de la contaminación atmosférica. Tal es la opinión de la OCDE, quien teme, además, que el rechazo generalizado de la ingeniería genética, por parte del público, produzca un retraso notable en la difusión de muchos procesos y productos beneficiosos para todos.

Basta un escueto par de bases nucleotídicas para encaminar un aminoácido hacia un ARN de transferencia específico. Tal es la conclusión a la que han llegado Ya-Ming Hou y Paul Schimmel en su desciframiento de un segundo código genético. Se halla éste escrito en la estructura de las aminoacil-ARNt sintetasas, enzimas responsables de la unión de los aminoácidos a las moléculas de ARNt.

El hombre se ha convertido en el factor principal de movilización global de oligoelementos en la biosfera. La toxicidad total anual de todos los metales reciclados (cadmio, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio, etcétera) sobrepasa la toxicidad total combinada de todos los residuos radiactivos y orgánicos producidos cada año.

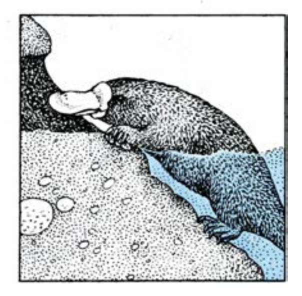
En múltiples ocasiones los jueces se han visto obligados a pronunciarse sobre pruebas de orden científico y técnico recabadas para el desempeño de su función. Se prevé que en el futuro la administración de justicia habrá de habérselas frecuentemente con resoluciones que exijan un sólido conocimiento de las teorías y los procesos científicos, en la misma medida en que la ciencia y la técnica vayan penetrando en el tejido social. El caso español del síndrome tóxico constituye un ejemplo claro.

Los zurdos viven menos que los diestros. Eso se deduce de las estadísticas publicadas, aunque se desconoce la razón última del fenómeno. Se han aducido, no obstante, algunas causas: mayor estrés prenatal y perinatal, efectos genéticos y hormonales que reducirían la eficacia de su sistema inmunitario y, por último, mayor riesgo de accidente en un mundo diseñado por diestros.

Sobre el origen del hombre existen dos hipótesis: el modelo del ''arca de Noé'' y el modelo de la continuidad regional. Para los defensores de la hipótesis del ''arca'', nuestra especie nació en un lugar determinado de Africa; para los partidarios del modelo de continuidad regional, *Homo sapiens* habríase originado, por evolución paralela, de *Homo erectus* y de los neandertales, instalados además en puntos geográficos dispares . De momento la razón —genética y paleontológica— se decanta en favor de los primeros. Los humanos modernos aparecieron en Africa, hace de ello 100.000 a 200.000 años.

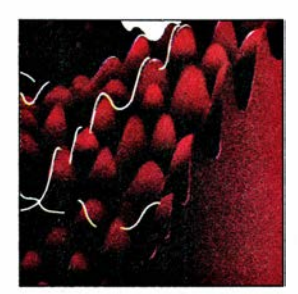
INVESTIGACION Y
CIENCIA

Julio de 1988 Número 142

12 

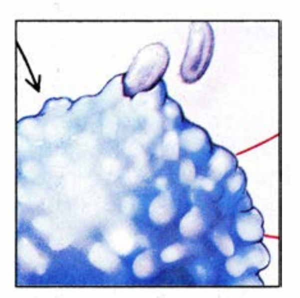
El ornitorrinco
Mervyn Griffiths

La combinación de una curiosa serie de rasgos ha posibilitado el éxito evolutivo de este mamífero. Bucea como las focas, pone huevos como los reptiles y tiene cola de castor. Su pico, de pato, es una suerte de antena que utiliza para descubrir el alimento: sus receptores captan los campos eléctricos generados por los invertebrados que componen su dieta.

20 

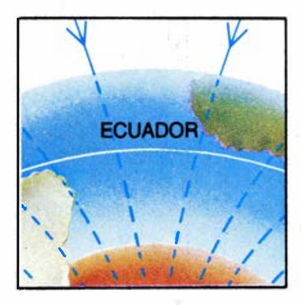
Luz comprimida
Richart E. Slusher y Bernard Yurke

Hasta en la oscuridad hay luz, es decir, hay fluctuaciones cuánticas o ruido. ¿Cómo eliminar este último? Comprimiéndolo: redistribuyéndolo de suerte tal que unas partes de la onda luminosa sean menos ruidosas, aunque otros sectores de la misma vean aumentadas sus fluctuaciones. La onda resultante puede utilizarse luego en mediciones de alta precisión.

28 

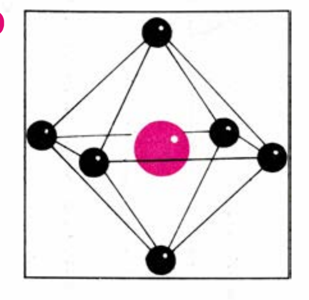
El factor de necrosis tumoral
Lloyd J. Old.

Desde hacía un siglo se sabía que las infecciones bacterianas remitían el cáncer. En 1975 el autor descubrió la razón: la infección estimulaba la secreción del factor de necrosis tumoral (TNF), portador de actividad anticancerosa. Se trata de un regulador importante de los procesos inflamatorios e inmunitarios, cuya eficacia es hoy objeto de estudio.

40 

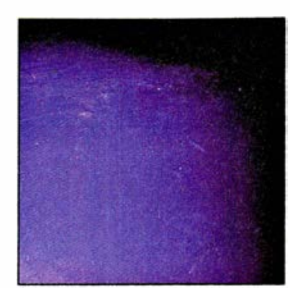
Inversiones magnéticas y dinamo terrestre
Kenneth A. Hoffman

El campo magnético terrestre se ha invertido repetidamente, circunstancia que parece estar produciéndose ahora mismo. Puede reconstruirse la historia de esas inversiones estudiando el magnetismo remanente en las rocas. El análisis de las antiguas inversiones da cuenta de la naturaleza de la dinamo que genera el campo magnético.

50 

Interacción de la radiación láser con los materiales
Carmen Ortíz

La interacción que se produce entre la radiación emitida por el láser y el material sobre el que actúa permite el estudio de las propiedades electrónicas, la formación de nuevos compuestos metaestables o la degradación irreversible de la estructura cristalina. Dicha interacción constituye uno de los dominios más fecundos de la investigación actual.

60 

Aerogeles
Jochen Fricke

Los geles son en su mayor parte líquido. Sustitúyase éste por aire u otro gas y se obtendrá un aerogel, un material singular cuyas propiedades constituyen un reto para físicos e ingenieros de producción. Su fabricación exige poca pericia, aunque resultan muy beneficiosos: los aerogeles de dióxido de silicio, por ejemplo, constituyen excelentes aislantes térmicos.

68 

El osario del estrecho de Indian
Francis P. McManamon y James W. Bradley

En 1979, durante unas labores de acondicionamiento, se desenterraron huesos humanos cerca de Wellfleet (Massachusetts). Pertenecían a un cementerio de 1000 años de antigüedad, que ha proporcionado nueva información sobre la prehistoria precolombina. El yacimiento corrobora la habitación permanente de aborígenes en Nueva Inglaterra.

76 

El misterio de la constante cosmológica
Larry Abbott

La constante, una medida de la energía del vacío, es "cosmológica" porque su valor repercute sobre la estructura y sobre el futuro del universo. La gran discrepancia advertida entre el valor teórico y el observado podría significar que la física moderna se halla en puertas de una nueva interpretación del espacio, del tiempo y de la materia.

SECCIONES

1 **Apuntes**

5 **Los autores**

8 **Hace...**

200 años se reedita *Las obras de Hipócrates más selectas*, de Andrés Piquer.

38 **Ciencia y sociedad**

84 **Juegos de ordenador**

El "profesor invisible" transforma las ecuaciones en vistosas curvas.

88 **Taller y laboratorio**

93 **Libros**

96 **Bibliografía**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

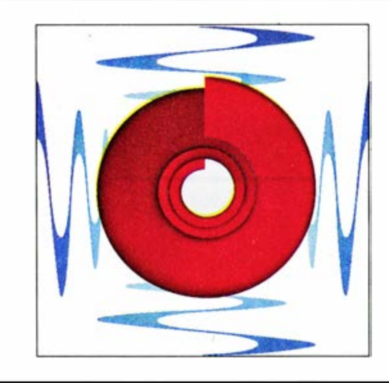
Manuel Crespo: *El ornitorrinco*; Ramón Pascual: *Luz comprimida*; Ana García García: *El factor de necrosis tumoral*; Manuel Puigcerver: *Inversiones magnéticas y dinamo terrestre*; Amando García Rodríguez: *Aerogeles*; Jaime Alvar: *El osario del estrecho de Indian*; Emili Elizalde: *El misterio de la constante cosmológica*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, José L. Comellas y Francesc Asensi

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
13	M. Prenzel, Animals Animals
14-17	Patricia J. Wynne
18	David C. Fritts, Animals Animals (*arriba*); Mervyn Griffiths (*abajo*)
19	Patricia J. Wynne
21-26	George V. Kelvin, Science Graphics
28	Lloyd J. Old
29	Helen Coley Nauts, Instituto de Investigación del Cáncer
30	Carol Donner (*arriba*), Lloyd J. Old (*abajo*)
31	Andrew Christie
32	Carol Donner (*arriba*); Michael A. Gimbrone, Jr., Facultad de Medicina de Harvard (*abajo*)
33	Murray Greenfield
34	Carol Donner
35	Edward A. Havell y Robert J. North, Trudeau Institute, Inc. (*arriba*); Barbara D. Williamson, Instituto Oncológico Sloan-Kettering
36	Murray Greenfield
39	M. García Velarde
41-47	Ian Worpole
51	Carmen Ortíz
52-58	Carmen Ortíz y Magda Mària
57-59	Carmen Ortíz
61	Quesada/Burke
62	Thomas C. Moore (*arriba*); Wolfram Görlitz, Universidad de Würzburg (*abajo*)
63-65	Thomas C. Moore
69	Servicio Nacional de Parques
70-73	Tom Prentiss
74	The Champlain Society
77-83	Joe Lertola
84	David Wiseman
85	Stanley S. Miller
86	David Wiseman (*arriba*). Bridge Software (*abajo*)
87	Laurie Grace, por cortesía de Lascaux Graphics
89	Charles A. Knight
90-91	Michael Goodman



LA PORTADA representa los campos eléctricos y magnéticos que forman un haz de luz "comprimida" (véase "Luz comprimida", por Richart E. Slusher y Bernard Yurke, en este mismo número). Las ondas verticales representan el campo magnético, las horizontales el campo eléctrico y, la espiral, su unión. Debido a la incertidumbre cuántica, en un instante dado cualquiera los campos no presentan valores definidos: no son líneas, sino tubos. Están "comprimidos": algunas de sus porciones están más definidas (son más delgadas) que otras.

Pintura de George V. Kelvin, Science Graphics

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X   Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MERVYN GRIFFITHS ("El ornitorrinco") se jubiló en 1975, siendo jefe de investigación de la Sección de Fauna de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) en Australia. En la actualidad, como becario honorario del CSIRO y profesor de la Facultad de Investigación Médica John Curtin de la Universidad Nacional Australiana, estudia la secreción de leche en los monotremas y los marsupiales. Formado en la Universidad de Sidney, amplió también estudios de fisiología en otras instituciones y sirvió durante cuatro años en las fuerzas aéreas australianas. Se incorporó a la CSIRO en 1959, donde nació su interés por la evolución de los marsupiales y los mamíferos ponedores de huevos.

RICHART E. SLUSHER y BERNARD YURKE ("Luz comprimida") son físicos experimentales de los laboratorios AT&T Bell. Slusher se doctoró por la Universidad de California en Berkeley en 1965. Ha estudiado las interacciones de la luz láser con muchas formas de materia: semiconductores, helio sólido, plasmas de tokomak y haces de átomos. Dirige el departamento de estado sólido y física cuántica de los laboratorios Bell y trabaja en la interpretación de los límites fundamentales de las no linealidades ópticas en los materiales. Yurke se recibió de doctor por la Universidad de Cornell en 1983; se incorporó después a los laboratorios Bell para desarrollar sus múltiples ideas sobre generación y detección de luz comprimida, nociones que, al coincidir con los recursos experimentales de Slusher, alimentaron una fructífera colaboración. Yurke está hoy entregado a la generación de radiación de microondas comprimida a temperaturas ultrabajas.

LLOYD J. OLD ("El factor de necrosis tumoral") ocupa la cátedra William E. Snee de inmunología del cáncer del Centro Oncológico Memorial Sloan-Kettering de Nueva York, donde ha trabajado en distintos frentes desde que, en 1958, se doctoró en medicina por la Universidad de California. De 1973 a 1983 fue vicepresidente y director de investigación del Instituto Oncológico Sloan-Kettering. Sus primeros experimentos le encarrilaron hacia la investigación del cáncer, con el sacrificio de su vocación clínica. Durante los últimos 20 años ha centrado gran parte de su actividad en la búsqueda de antígenos específicos del cáncer, respuestas de los anticuerpos a las células tumorales en pacientes afectos de melanoma y desarrollo de un programa de vacunación contra el melanoma. Old participa en otras instituciones dedicadas a la lucha contra ese azote de nuestro tiempo.

KENNETH A. HOFFMAN ("Inversiones magnéticas y dinamo terrestre") es profesor de física de la Universidad Politécnica estatal de California en San Luis Obispo y redactor del *Journal of Geophysical Research*. Licenciado en física en 1966 por la Universidad de California en Berkeley, se doctoró allí en geofísica en 1973, realizando luego trabajos de investigación postdoctoral en la Universidad de Minnesota. En 1974 se incorporó a la Politécnica de California. Hoffman, que durante los últimos diez años ha dedicado mucho tiempo al estudio del proceso de inversión geomagnética, es autor y coautor de los tres últimos informes cuatrienales sobre inversión geomagnética elevados por la Comisión Nacional norteamericana de la Unión de Geodesia y Geofísica a la organización internacional. Actualmente está llevando a cabo investigaciones paleomagnéticas en Molokai, en Hawai y en la isla de la Reunión.

CARMEN ORTIZ ("Interacción de la radiación láser con los materiales") dirige un grupo de trabajo en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas sobre el tema desarrollado en su artículo, escrito en el centro que IBM tiene en San José, California. Comenzó la carrera de ciencias físicas en la Universidad Complutense. Pasó luego a la de Stuttgart, donde se doctoró, título académico que revalidó en la de Madrid. Ha profundizado en distintos aspectos de la física del estado sólido desde su prolongada estancia en el Instituto alemán de la Ciencia de los Materiales, al acabar la carrera, hasta su reiterada colaboración con IBM en su centro de Almaden.

JOCHEN FRICKE ("Aerogeles") es profesor de física experimental de la Universidad de Würzburg, Alemania Occidental. En 1967 se doctoró por la Universidad Politécnica de Munich; pasó luego dos años en la de Pittsburgh. Desde 1970 es redactor de la revista alemana de física *Physik in unserer Zeit*. Las investigaciones de Fricke se centran actualmente en la optimización de superaislantes térmicos y en las propiedades de sólidos muy porosos.

FRANCIS P. McMANAMON y JAMES W. BRADLEY ("El osario del estrecho de Indian") trabajaron juntos en las excavaciones del cementerio realizadas por el Servicio de Parques Nacionales y de otros yacimientos de la Seashore del cabo de Cod. McManamon, jefe de la división de asistencia de los Servicios Arqueológicos del Parque, acabó en 1984 su formación académica en la Universidad estatal de Nueva York en Binghamton. Se interesa desde hace tiempo por la prehistoria del nordeste del continente norteamericano, por las técnicas arqueológicas y por la excavación histórica y recientemente ha empezado a estudiar la arqueología de la costa del Pacífico. Bradley dirige el plan de conservación de la Comisión Histórica de Massachusetts. Doctor por la Universidad de Siracusa, ha escrito numerosas obras sobre los primeros contactos entre los aborígenes y los europeos y el consiguiente proceso de cambio cultural.

LARRY ABBOTT ("El misterio de la constante cosmológica") enseña física en la Universidad de Brandeis. Se recibió de doctor en física en 1977. Dos años después volvió a la facultad de Brandeis, tras haber trabajado en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) y en el CERN, el Centro Europeo de Investigación Nuclear, con sede en Ginebra. Escribe el autor: "Durante los últimos años me he interesado en la aplicación de las nuevos postulados de la física de partículas a la cosmología; he trabajado en cosmología inflacionaria, en el estudio de la materia oscura y en la estructura a gran escala del universo. Al propio tiempo, me ha intrigado el problema de la constante cosmológica. Ultimamente he investigado las implicaciones de las observaciones de neutrinos procedentes de la supernova 1987A y me he interesado por la física de las redes neurológicas".

Hace...

José M.ª López Piñero

...doscientos años

Comenzó a publicarse la tercera edición de *Las obras de Hipócrates más selectas*, de Andrés Piquer.

Poco después de su traslado a Madrid, Piquer concibió el proyecto de publicar una serie de volúmenes dedicados a "las obras de Hipócrates más selectas, con el texto griego y latino puesto en castellano, e ilustrado con las observaciones prácticas de los antiguos y modernos". Conforme a su costumbre, el esfuerzo estaba destinado a "la juventud española que se dedica a la medicina". Consideraba como "legítimos libros de Hipócrates" los *Pronósticos*, el primero y tercero de las *Epidemias*, los *Aforismos, De los aires, aguas y lugares* y *Sobre los humores*. Afirmaba que en todos ellos "no hace Hipócrates otra cosa que proponer los hechos experimentales que había alcanzado por propias observaciones y las de sus mayores, y en ellos no se descubre ningún razonamiento filosófico que puede ser destruido con el tiempo". Dada su mentalidad, resulta lógico que se interesara especialmente por las "katástasis" o "constituciones epidémicas" y las historias clínicas contenidas en las *Epidemias*. Sin embargo, comenzó publicando un volumen dedicado a los *Pronósticos*, siguiendo una clásica recomendación de Galeno: "Galeno decía muy bien que, para leer estas historias (clínicas) de Hipócrates con orden, era menester empezar por los *Pronósticos* y luego venir a las *Epidemias*, porque en los enfermos de éstas se ve la aplicación práctica de las sentencias generales que hay en aquellos". Editó luego otros dos volúmenes, correspondientes ambos a las *Epidemias*, el último de ellos poco antes de su muerte, que le impidió completar su proyecto original.

El volumen primero de *Las obras de Hipócrates más selectas*, apareció en Madrid en 1757, impreso por Joaquín Ibarra, como lo serían los otros dos. Está encabezado por una dedicatoria en latín a Fernando VI, quien fallecería dos años después de una enfermedad sobre la que Piquer dejó manuscrito un detallado y brillante estudio clínico. Figura a continuación una larga "Prefación", en la que se ocupa de la "patria, viajes y estudios de Hipócrates", de sus escritos y de su "doctrina y autoridad", terminando con una "comparación de Hipócrates y Galeno". Dicha comparación sirve a Piquer para exponer una vez más su postura antisistemática: "La principal diferencia que la juventud debe notar entre estos dos príncipes de la medicina consiste en que Hipócrates nada estableció que no lo fundase en observaciones bien hechas, y Galeno lo más de su medicina lo funda en razonamientos filosóficos; con que del uno al otro hay la diferencia que se halla entre un filósofo experimental y un sistemático. De ahí dimana que la medicina de Hipócrates es perpetua, porque lo son las leyes de la naturaleza que tiene por objeto; la de Galeno es mudable y poco constante, como lo son los razonamientos sistemáticos de la filosofía". En este contexto, se preocupa de advertir que su oposición a los sistemas no significa negar la importancia de la medicina teórica: "Si yo viese a un médico bien instruido en la física experimental, práctico en la anatomía, versado en las obras de la naturaleza, de modo que todos estos conocimientos, dirigidos por la razón y combinados con buen orden, los aplicase al ejercicio práctico de la medicina, le tendría por el teórico más aventajado y útil que puede haber; pero si en lugar de estas cosas le hallase noticioso de los elementos y sus cualidades, de los cuatro humores, o de la fuerza del ácido y álcali, y otras cosas a este modo, llenas de incertidumbre y mal averiguadas, aunque las combinase como quisiese, le tendría por teórico bueno para hablar, pero para curar poco útil. En conclusión, la medicina, así teórica como práctica, debe ser experimental y la bondad mayor de ella siempre se ha de medir por el fundamento que las máximas tengan en la racional experiencia".

El resto del volumen está dedicado a los *Pronósticos*, incluyendo en cada página el texto griego, su traducción al latín y al castellano, así como "ilustraciones" o comentarios. Piquer reprodujo la edición del texto griego que en el siglo XVI había publicado el alemán Anutius Foesius y también la versión latina de Cristóbal de Vega, realizando personalmente la traducción al castellano, aparte de redactar los comentarios.

Similar es la estructura del volumen segundo y tercero, que aparecieron respectivamente en 1761 y 1770 y que, como hemos adelantado, están consagrados a las *Epidemias*. La dedicatoria en esta ocasión va dirigida, en castellano, "al Rey Nuestro Señor D. Carlos III". Aparte de dos "prefaciones" poco extensas, incluyen los "libros" primero y tercero del tratado, únicos que, como hemos dicho, consideraba Piquer "legítimos de Hipócrates" y también una selección del segundo, a pesar de que lo juzgaba apócrifo. El texto griego vuelve a reproducir el de la edición de Foesius, mientras que la versión latina corresponde a la que en 1717 había publicado el inglés John Freind.

Las obras de Hipócrates más selectas tuvieron una segunda edición, impresa también por Joaquín de Ibarra en Madrid. Su primer volumen apareció en 1769, en vida todavía de Piquer, y el último, en 1781, nueve años después de su muerte. La única variación de importancia respecto de la anterior es la supresión del texto griego de los *Pronósticos*, ya que las demás se limitan a unas pocas frases adicionales en los comentarios y a la corrección de detalle de un párrafo del texto hipocrático. En 1788, como hemos adelantado, comenzó a publicarse una tercera edición, pero quedó limitada al volumen primero.

Piquer cumplió en sus comentarios al texto hipocrático su proyecto de "ilustrarlo con las observaciones prácticas de los antiguos y modernos". En general, rechaza los comentarios de tipo escolástico y aprovecha las aportaciones de la tradición "hipocratista", en especial las de Francisco Valles y Pedro Miguel de Heredia, aunque sin ocultar su distanciamiento radical del galenismo. Incorpora también las ideas del "incomparable Sydenham", así como abundantes materiales procedentes de médicos del siglo XVIII, en primer término de Gerard Van Swieten, pero también de otros destacados autores centroeuropeos, italianos, franceses y británicos. Aunque sus objetivos son estrictamente médicos, utiliza las contribuciones de la erudición, desde el *Iudicium* renacentista de Lemos, hasta los estudios entonces recién publicados de Casiri acerca de los manuscritos árabes de la biblioteca de El Escorial.

Por otra parte, incluye en sus co-

mentarios numerosas observaciones propias y, como era inevitable, defiende sus opiniones y puntos de vista personales, tanto en cuestiones generales como en temas concretos. En varias ocasiones insiste, por ejemplo, en la importancia del aire como principal agente etiológico general, concediendo por el contrario escaso relieve a la dieta, a pesar de que la entendía en el amplio sentido tradicional: "no sólo los manjares, sino también las demás cosas que son necesarias para que el cuerpo se mantenga sano, como son el sueño, las pasiones del ánimo, el buen régimen de los excrementos y el uso de aquellas cosas que los médicos llaman no naturales". Afirma de modo terminante que "las enfermedades que la dieta produce son pocas, bien al contrario de lo que piensan los médicos... mas las que vienen del aire son muchísimas y, en mi concepto, casi todas".

En otro lugar matiza, sin embargo, tan extremado ambientalismo, adhiriéndose a la famosa distinción de Syndenham acerca del papel predominante del ambiente en la génesis de las enfermedades agudas y del régimen de vida en las crónicas: "Sydenham, que en todo siguió las pisadas de Hipócrates y se le acercó bastante, dice que las enfermedades agudas tienen a Dios por autor y las crónicas a nosotros mismos, añadiendo que las enfermedades epidémicas que comúnmente se padecen dimanan de una constitución particular del ambiente". Desde una perspectiva muy alejada de sus entusiasmos juveniles iatromecánicos, califica de "impertinente prolijidad" la formación de "diarios de observaciones hechas con el barómetro y termómetro" que, en su opinión, "no descubren sino la variedad de cada día, y esto no conduce mucho para conocer las constituciones generales de los tiempos". Con este motivo critica a Feijoo: "Es verdad que Feijoo estimó mucho el barómetro y termómetro, teniéndolos *por testigos de mayor excepción*, pero este escritor es muy exagerativo en lo que aprende y suele tomar a favor de las invenciones modernas de la física unos derrumbaderos muy extraños, por seguir más los sistemas que la observación".

En estas ocasiones, la mentalidad antisistemática de Piquer le conduce a mantener puntos de vista coherentes con la línea histórica que conduciría a los planteamientos anatomoclínicos. El caso más claro e importante corresponde a las llamadas "fiebres esenciales", amplio capítulo de la patología tradicional que, como es sabido, desaparecería definitivamente a comienzos del siglo XIX, cuando Broussais y otros anatomoclínicos las explicaron como fenómenos secundarios de lesiones ana-

196 EL LIBRO PRIMERO DE LAS EPIDEMIAS

tur, eaque non ſubſidebat, ſed colore & craſsitudine veterini generis urinas referebat; atque iſtiuſmodi fuerunt urinae, quas mihi videre licuit. Ad decimum quartum diem, totum corpus palpitationes occuparunt, multum loquebatur, aliquantulum mente conſtabat, ſed confeſtim rurſus deſipuit. Circa decimum ſeptimum, voce defecta eſt. Vigeſimo, obiit.

AEGER

bolvia un poco en sì, y luego bolvia á delirar. El dia diez y ſiete ſe le quitò la voz, y el dia veinte muriò.

EN-

„ por la incommodidad que experimenta. El deſvelo es muy gran-
„ de, la afliccion de ánimo es tal, que le parece ſiempre que ſe
„ muere, y no obſtante logra algunos ratos, en que parece eſtàr
„ con alivio. Quando la enfermedad aumenta, ademàs de todas
„ eſtas coſas, hay temblores, y movimientos convulſivos, la cara
„ ſe pone muy encarnada, las arterias del cuello laten ſenſiblemen-
„ te, la ſed es muy moleſta; pero la enferma no guſta del agua:
„ pocas veces hay delirio; antes por el contrario eſtà la paciente
„ con una vigilia grande, y ſuma advertencia à todas las coſas.
„ Quando eſta enfermedad llega à ſu mayor vigor, ſi la enferma
„ ha de morir, à todo lo dicho ſe añade dificultad en la reſpira-
„ cion con deſeos de eſtàr ſentada. Los ojos ſe ponen triſtes con
„ algun eſplendòr, el pulſo ſe hace mas humilde, ſin perder la du-
„ reza que ſiempre ha tenido. Las orinas durante toda la enferme-
„ dad eſtàn crudas; pero en el eſtado de ella, crudiſsimas. A todo
„ eſto ſe añaden curſos ſeroſos, acres, con pedacitos à manera de
„ raeduras, ò hilachas. Siguefe à tantos males la frialdad de los
„ extremos, la dificultad ſuma de la reſpiracion, diminucion muy
„ grande en los pulſos, y la muerte. Si la enferma ha de curar, ſu-
„ cede una de dos coſas, es à ſaber, ò que la purgacion, que ne-
„ ceſſariamente ſe ſuprime en eſte mal deſde los principios de èl,
„ buelva otra vez à correr, ò que ſalga la eriſipela à las partes ex-
„ ternas, y à los muslos, produciendo en ellos dolor, y entumeci-
„ miento. Padecen tambien eſta enfermedad las preñadas; y es en
„ ellas mas peligroſa, que en las paridas.

EN-

DE HIPPOCRATES. 197

AEGER QUINTUS.

Ἐπικράτεος γυναῖκα, ἣ κατέκειτο παρὰ Ἀρχιγέτην, περὶ τόκον ἤδη ἐοῦσαν, ῥῖγος ἔλαβεν ἰσχυρῶς· οὐκ ἐθερμάνθη, ὡς ἔλεγον· καὶ τῇ ὑστεραίῃ τοιαῦτα. Τρίτῃ δὲ, ἔτεκε θυγατέρα, καὶ

τ

ENFERMO QUINTO.

La muger de Epicrato, que vivia junto à Archigete, eſtando yà cercana al parto, tuvo un gran temblor y frio de todo el cuerpo; mas no la en-

trò

ENFERMO QUINTO.

YA hemos viſto en la hiſtoria antecedente, que muriò la muger de Filino, y en la preſente vémos, que curò la de Epicrato, ſin embargo de que las enfermedades, que padecieron, fueron muy ſemejantes. Para que puedan, pues, los Jovenes conocer la diferencia que hay entre eſtos males, y entiendan tambien lo que ſe ofrecerà decir en las hiſtorias ſiguientes, quiero ſentar aqui algunas obſervaciones prácticas ſobre las inflamaciones, las quales ſirvan de norma para el conocimiento, y curacion de ellas. Yà hemos moſtrado en las *Iluſtraciones de los Pronoſticos*, que Hippocrates, y los Medicos de ſu tiempo, por inflamacion no entendieron tumor, como ahora, de modo, que para ſignificar la enfermedad, que en nueſtros tiempos llaman flegmòn, decian entonces inflamacion con tumor, y dolor. Es, pues, la inflamacion en general una afeccion de nueſtro cuerpo, que produce tres neceſſarios efectos, es à ſaber, calor igneo, acrimonia è irritacion, y putrefaccion. A eſtos tres efectos de toda inflamacion acompañan otros tres, à cada uno el ſuyo, es à ſaber, al calor igneo la calentura, à la acrimonia la convulſion, à la putrefaccion la diſgregacion ò deſunion de los humores. Si los Medicos ponen cuidado en obſervar atentamente, hallaràn, que todas eſtas coſas concurren en las inflamaciones de qualquiera naturaleza que ſean, mas, ò menos, ſegun la grandeza de la inflamacion, y del lugar donde reſide. Aſsi el calor, como la acrimonia, y putrefaccion, que hay en todas las inflamaciones,

Doble página de Las obras de Hipócrates más selectas, *de Andrés Piquer. Incluye el original griego del texto hipocrático, su traducción al latín y al castellano, y la "ilustración" o comentario de Piquer.*

tómicas concretas de carácter inflamatorio. Piquer opina que "todas las calenturas muy agudas o vehementes, o proceden o andan juntas con inflamación de las partes internas... la inflamación aguda siempre lleva consigo calentura; la crónica lleva calentura de la parte afecta, pero no siempre la lleva general y que se descubra en todo el cuerpo". Resulta muy significativo que aduzca el parecer de Francisco Valles, quien en sus comentarios a las *Epidemias* había afirmado, en la misma línea, lo siguiente: "Deseo hacer constar a este propósito algo que considero muy verdadero: que las fiebres muy agudas y perniciosas no pueden producirse sin ninguna afección interna".

Anotemos, por último, la postura relativa a la terapéutica que Piquer expone también en sus "ilustraciones" al texto de las *Epidemias*. Sin llegar a propugnar una actitud expectante, como hicieron algunos autores de la "alte Wiener Schule", defiende repetidas veces una medicación sencilla y critica la inclinación a la polifarmacia incluso tratándose de los autores que más respeta. Una de dichas críticas va dirigida a la terapéutica que recomienda una disertación sobre la tos convulsiva incluida en las *Disputationes practicae selectae* (1756-60) recogidas por Albrecht von Haller: "En la curación apura este autor la medicina, porque sangra, da vomitivos, medicamentos pectorales de todas suertes, el ruibarbo, la quina, vejigatorios y, pareciéndole que todavía queda corto, concluye diciendo: *Longum nimis foret, si omnia commemorem quae in hoc morbo specifica habentur*. Tan cierto es, que se tiene hoy por gran práctico el que para una enfermedad, curable con muy pocos remedios, apura una botica". La postura terapéutica de Piquer se ajusta exactamente al "naturalismo terapéutico" de la Ilustración, tal como ha sido caracterizado por Lain Entralgo, uno de cuyos elementos fue el recurso a las "fuerzas naturales", entre ellas, el agua. Acerca de esta última, el médico aragonés reitera en sus comentarios a las *Epidemias* lo que ya había expuesto con mayor amplitud en su *Tratado de calenturas*: "aunque el agua no es remedio universal, es poderosa, segura y eficaz medicina de grandes enfermedades; de modo que si los médicos la saben manejar, aprovecharán más con ella, así en la preservación como en la curación de las dolencias, que con cuantas pócimas y composiciones pomposas ofrece la ostentación de la farmacia".

El ornitorrinco

De refinada especialización, este antiquísimo animal posee en el pico receptores mecánicos y eléctricos para localizar las presas. Regula su temperatura mejor que muchos mamíferos placentarios

Mervyn Griffiths

El ornitorrinco despertó el interés del mundo occidental en 1799, cuando el londinense George Shaw lo describió en *The Naturalists Miscellany*: "De todos los mamíferos conocidos, es éste el de configuración más extraordinaria; presenta el equivalente exacto del pico de un pato, implantado en la cabeza de un cuadrúpedo... A primera vista induce naturalmente a pensar en algún montaje fraudulento por medios artificiales."

Shaw creía que el ornitorrinco, de pies palmeados, "debe residir en entornos acuáticos; que excava madrigueras en las márgenes de los ríos o bajo tierra; y que su dieta alimentaria se compone de plantas y animales acuáticos". Le dio el nombre de *Platypus anatinus* (animal anatiforme de pies planos), que luego se cambió por el de *Ornithorhynchus anatinus* (animal anatiforme de hocico de ave).

Su descripción se basaba en un material muy exiguo: una piel y un boceto que, según se cree, habían sido enviados a New-Castle-upon-Tyne desde Australia por el capitán de navío John Hunter, de la Armada Real británica, que supo de la existencia del ornitorrinco siendo gobernador de la colonia penal británica de Nueva Gales del Sur. Pese a ello, ese primer informe de Shaw resulta puntillosamente exacto.

Incluso hoy, cualquier observador casual resaltaría que el ornitorrinco ofrece el aspecto de varios animales mezclados en uno. Abrigado con una piel deliciosamente suave, este gracioso mamífero anfibio presenta una cola muy similar a la del castor y un pico muy parecido al del pato. Tiene los pies palmeados y, aunque posee glándulas mamarias con las que amamanta a las crías, no da a luz, sino que pone huevos que incuba —y eclosionan— fuera del cuerpo. Los machos adultos pesan sólo 1,7 kilogramos y miden 50 centímetros desde la punta del pico hasta el extremo de la cola. Las hembras son aún menores: 43 centímetros de longitud y 0,9 kilogramos de peso.

El ornitorrinco es una de las tres especies de dos familias —Ornithorhynchidae y Tachyglossidae (esta última engloba los dos géneros de equidnas)— conocidas colectivamente como monotremas, o mamíferos ponedores de huevos. El nombre de monotrema (del griego *mono*, uno, y *trema*, agujero) hace referencia al hecho de que poseen una sola abertura externa, la cloaca, para la excreción y la reproducción.

Los monotremas están muy especializados, pero representan una rama de mamíferos muy antigua. Están más estrechamente emparentados con los mamíferos marsupiales y placentarios que con cualquier grupo de reptiles, aunque en el curso de la evolución hayan conservado un número sorprendente de caracteres reptilianos ancestrales y exhiban un interesante mosaico de rasgos de mamífero y de reptil. Cuando se señaló su afinidad con los reptiles, a comienzos del siglo XIX, se produjo una gran confusión en el seno de la comunidad científica; llegó a proponerse incluso que el ornitorrinco era el eslabón perdido entre los mamíferos y los reptiles.

En 1802, el anatomista inglés Sir Everard Home publicó una descripción del ornitorrinco en la que afirmaba que, al igual que los reptiles, el macho posee testículos internos y, la hembra, cloaca. Este último hallazgo resultaba de especial interés porque, según se sabía, ese carácter lo presentaban los lagartos ovovivíparos —que retienen los huevos en el tracto genital hasta que están a punto de eclosionar.

El vínculo evolutivo entre los reptiles y los monotremas se reforzó en 1826, cuando el anatomista alemán Johann F. Meckel advirtió que varios huesos de la cintura escapular del ornitorrinco (el coracoides, el epicoracoides, las clavículas y la interclavícula media) sólo aparecen en los terápsidos fósiles: reptiles extintos, parecidos a mamíferos, que se cree que fueron el grupo a partir del cual evolucionaron todos los mamíferos. Consignó, asimismo, el hallazgo de glándulas mamarias en las hembras: carácter anatómico incuestionablemente propio de los mamíferos.

Sin embargo, el modo de reproducción del ornitorrinco siguió constituyendo un enigma hasta unos ochenta años después de la descripción de Home, cuando el joven y decidido investigador escocés W. H. Caldwell, de la Universidad de Cambridge, partió rumbo a Queensland. Intrigado por la descripción del tracto reproductor que había realizado Home, deseaba zanjar la cuestión de la naturaleza ovovivípara de los monotremas. Poco después de llegar al sur de Queensland, dio con la respuesta que andaba buscando: el ornitorrinco y el equidna no daban a luz como los demás mamíferos, sino que ponían huevos, como los reptiles. Además, descubrió que los huevos de los monotremas, igual que los de reptil, eran meroblásticos: sólo se dividía el núcleo y el citoplasma del polo superior, o extremo anterior, del huevo, pero no la yema.

Desde entonces han ido saliendo a la luz nuevos datos que vinculan el ornitorrinco con sus antepasados reptilianos. Incluso en la escala celular, varios caracteres le acercan más al reptil que al mamífero marsupial o placentario. Peter D. Temple-Smith, de la Universidad Nacional Australiana, y R. Leon Hughes, de la Universidad de Queensland, descubrieron que los espermatozoides de ornitorrinco eran largos y delgados, de cabeza filiforme, muy del estilo reptiliano; empero, la disposición de los microtúbulos subcelulares era típica de los espermatozoides de mamífero.

Los cromosomas de los monotremas patentizan, asimismo, una mezcla de rasgos reptilianos y de mamífero. Estos

animales tienen la singularidad de presentar dos clases de cromosomas (grandes y pequeños); los grandes (macrocromosomas) son parejos de los que se dan en los mamíferos, mientras que los pequeños (microcromosomas) son similares a los de muchas especies de reptiles y no los poseen otros mamíferos.

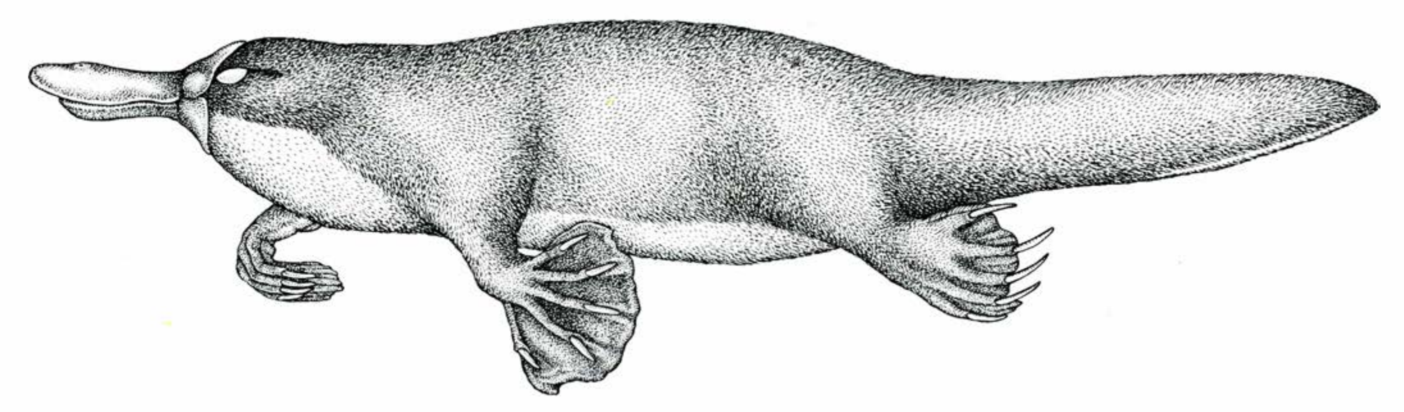
A comienzos de siglo, sometido a una intensa caza por el atractivo de su piel, densa y suave, el ornitorrinco llegó poco menos que a extinguirse. Hoy goza de una estricta protección en toda su área de distribución, con imposición de fuertes multas para los furtivos, por lo que la especie ha experimentado una notable recuperación. Los censos publicados por Temple-Smith, Tom Grant (de la Universidad de Nueva Gales del Sur), Gordon Stone (del Servicio de Fauna y Parques Nacionales de Queensland) y el autor en 1973, 1983, 1985 y 1988, demuestran que en la actualidad hay ornitorrincos, e incluso abundan, en las aguas de la Gran Divisoria —desde el norte de Queensland hasta el sur de Tasmania.

El ornitorrinco ha sido objeto de mucha atención en los últimos años; numerosos investigadores se han entregado al estudio de su fisiología y su bioquímica en el laboratorio, pero pocos han estudiado el animal en su propio hábitat, en buena medida porque es muy tímido y escurridizo. Endémico de las lagunas y cursos de agua del este de Australia, se muestra muy activo durante la noche, cuando bucea en busca de invertebrados bentónicos, como larvas de insecto, crustáceos y moluscos bivalvos. Durante el día, se retira a una madriguera que habrá construido a orillas del agua, donde desarrolla un comportamiento que apenas se conoce. No obstante esos inconvenientes que entorpecen su estudio, se está abandonando la vieja idea que lo convertía en mero vestigio evolutivo, a medio camino entre los reptiles y los mamíferos y poco adaptado a la vida moderna. Comienza a considerársele un mamífero de éxito, sumamente especializado.

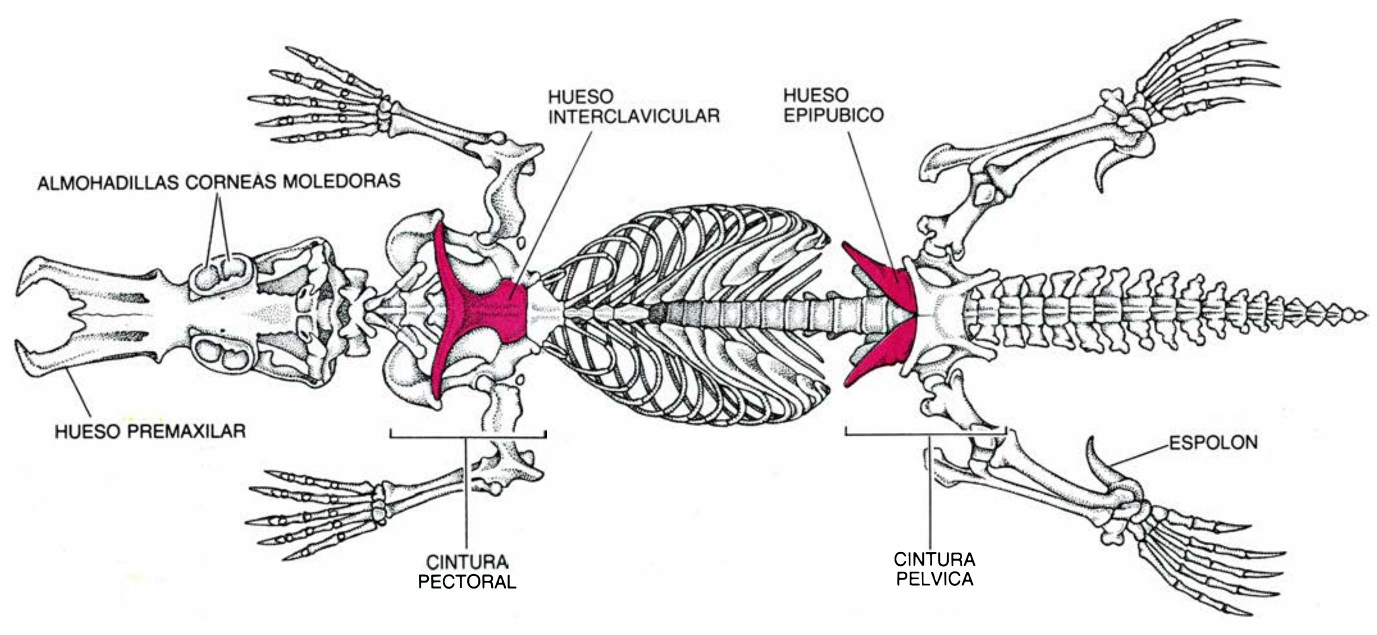
Los datos sobre su ciclo biológico, recogidos por Grant durante los últimos 15 años, han brindado abundante información sobre la longevidad del ornitorrinco y sobre sus movimientos. Ayudado de redes suspendidas en el agua, Grant capturaba los animales, les adaptaba un brazalete metálico, nu-



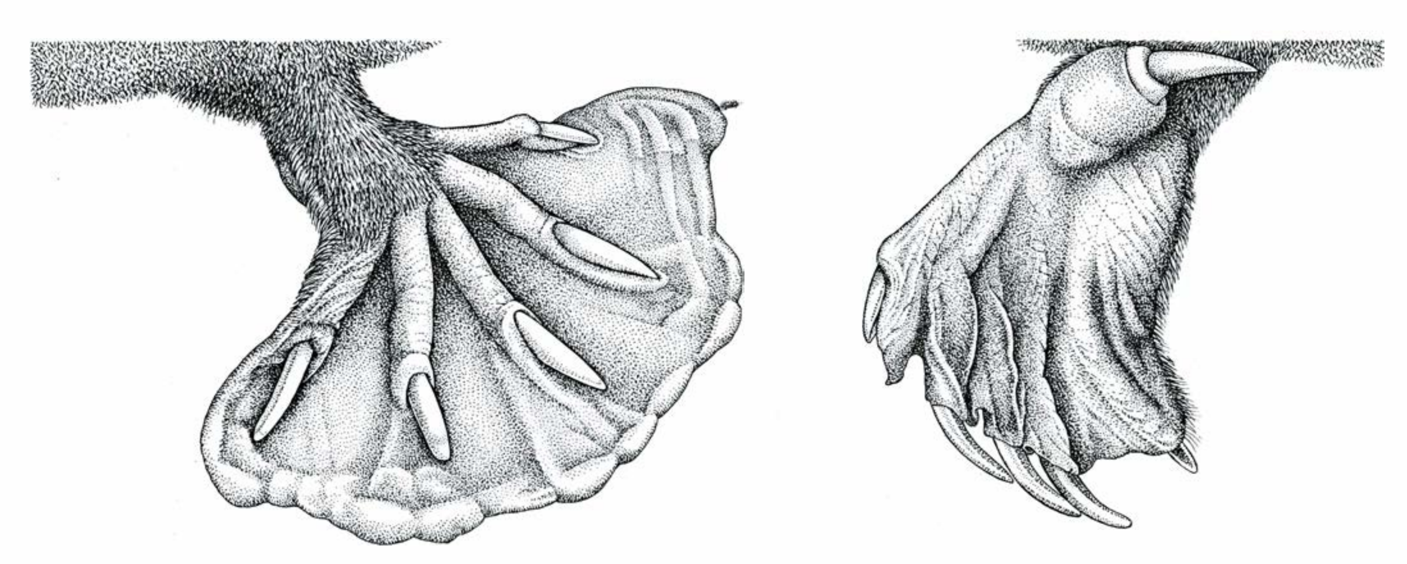
1. ORNITORRINCO. De comportamiento anfibio, pasa varias horas al día buscando invertebrados en el fondo de los ríos y lagos de agua dulce. Durante la zambullida, a menudo en aguas oscuras, cierra los ojos, los oídos y las ventanas nasales. Para encontrar las presas y sortear los obstáculos, cuenta con miles de receptores en su anatiforme hocico, que reaccionan al tacto y a las corrientes eléctricas. El pico constituye el principal órgano sensorial del ornitorrinco.



2. PERFIL HIDRODINAMICO del ornitorrinco, eficaz tanto en el agua como en tierra firme. Cuando se encuentra sumergido, como se ha representado aquí, maniobra por su entorno impulsándose con las extremidades anteriores, que utiliza a modo de aletas. En tierra avanza agarrándose al substrato con las uñas.



3. ESQUELETO de un ornitorrinco moderno (en perspectiva ventral), que presenta en parte rasgos propios de los mamíferos y en parte características de reptil. Como todos los primeros, posee siete vértebras cervicales; sin embargo, otros caracteres (*color*), por ejemplo las costillas cervicales, la interclavícula de la cintura pectoral y los huesos epipúbicos de la cintura pelviana, recuerdan la anatomía de un reptil. El hueso premaxilar se ha dilatado hasta formar un pico y, en vez de dientes, posee placas córneas moledoras. Los jóvenes tienen molares degenerados que en la época del destete se sustituyen por almohadillas córneas.



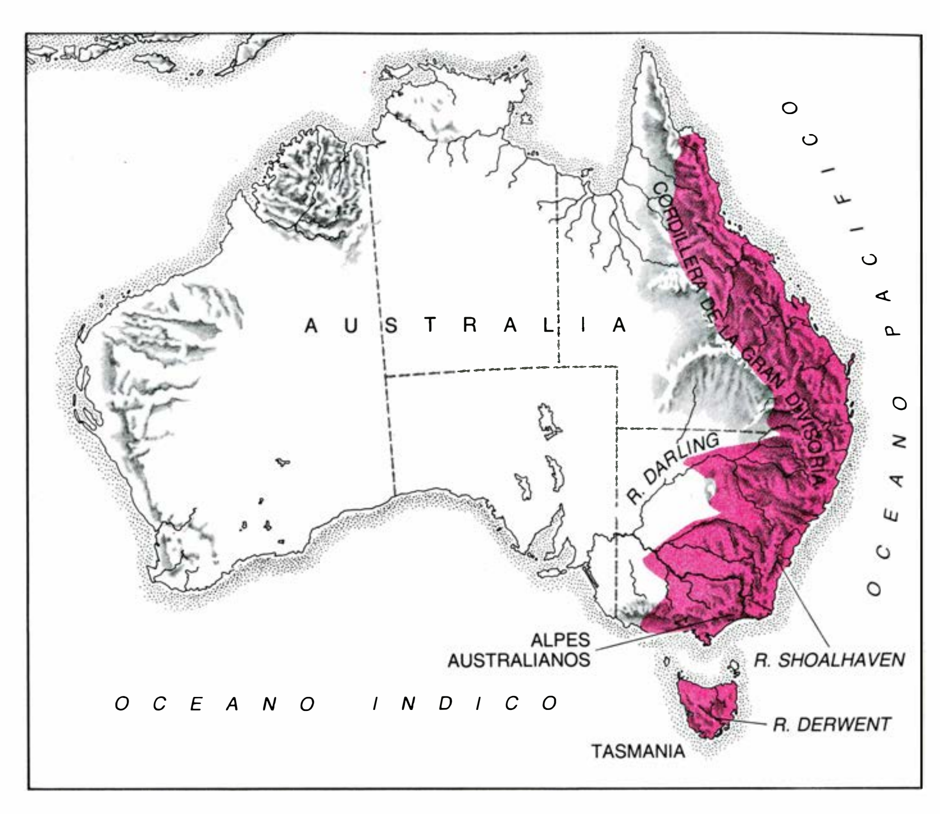
4. MANOS Y PIES del ornitorrinco, cortos y próximos al cuerpo. La mano (*izquierda*) está muy palmeada y constituye el principal medio de propulsión del animal en el agua. En tierra, las membranas interdigitales se retraen, exponiéndose las fuertes uñas con que el animal se agarra al terreno y excava su madriguera. Las uñas del pie (*derecha*) también contribuyen a la tracción; los machos poseen además un espolón hueco, próximo al tobillo, que comunica con una glándula venenosa y descarga una toxina mortífera durante los enfrentamientos agresivos con otros animales, a menudo en defensa de su territorio.

merado, en una de las patas traseras y los liberaba de nuevo en el mismo lugar donde habían sido capturados. Hasta la fecha ha marcado y recapturado 468 ornitorrincos a lo largo de 11 kilómetros del río Shoalhaven, en Nueva Gales del Sur. Gracias a su trabajo, sabemos que el monotrema vive hasta 12 años, se reproduce con éxito hasta la vejez (Grant ha capturado hembras de al menos 11 años de edad que todavía daban de mamar) y puede pasar la mayor parte de su vida en el mismo entorno acuático.

Las aportaciones de Temple-Smith al esclarecimiento de los procesos de la fisiología reproductora del ornitorrinco han sido notables. Se reproducen estacionalmente: durante el verano y principios de otoño, los órganos reproductores de los machos y las hembras son pequeños e inactivos; llegados los meses de mayo, junio y julio, las glándulas asociadas con la reproducción empiezan a crecer y a secretar hormonas. Paralelamente, se experimenta un cambio notable en el comportamiento de los machos: se vuelven agresivos, entregándose a frecuentes peleas entre sí.

El macho tiene un espolón hueco en las patas traseras; orientado hacia dentro, afilado y de hasta 1,5 centímetros de longitud, está repleto de un potente veneno. Los espolones se utilizan en las peleas con otros machos; Temple-Smith cree que pueden desempeñar una función importante en la delimitación de territorios o en la competencia con otros machos por el acceso a una hembra. Produce la toxina en cuestión una glándula especial —la crural— situada en la parte alta de la pata. En agosto, cuando la glándula crural y la espermatogénesis se encuentran en su apogeo, la agresividad del macho llega también a su punto máximo.

La potencia del veneno secretado por dicha glándula resulta incuestionable: animales del tamaño de un perro mueren por recibir un espolonazo, al parecer de paro respiratorio y cardiaco. Temple-Smith experimentó en carne propia los efectos subletales del veneno inyectándose 0,05 mililitros en el antebrazo: su informe corrobora anteriores testimonios sobre los angustiosos dolores que padecen quienes reciben accidentalmente el aguijonazo de un ornitorrinco macho.



5. AREA de distribución del ornitorrinco, que se circunscribe a los sistemas dulceacuícolas del este de Australia, en los que pueden encontrarse ejemplares tanto a oriente como a occidente de la Gran Divisoria. Habitan en cursos de agua con temperaturas que varían desde la proximidad del punto de congelación (en los Alpes Australianos) hasta las típicamente subtropicales del extremo norte de su área de distribución.

El cortejo entre los ornitorrincos se ciñe a un ritual muy complejo, que contempla la realización de diversas actividades acrobáticas en el agua. Ronald Strahan y David E. Thomas, del Parque Zoológico de Taronga, han visto a menudo que el macho agarra por la cola a la hembra receptora. Acto seguido, ambos nadan lentamente en círculo durante varios días, al cabo de los cuales tiene lugar la cópula. Consumada ésta, en la trompa de Falopio izquierda se depositan de uno a tres (normalmente dos) huevos cargados de vitelo, de entre 4 y 4,5 milímetros de diámetro. (El ovario derecho del ornitorrinco no es funcional). En la trompa tiene lugar la fecundación y es donde el huevo adquiere la primera lámina del cascarón.

La determinación del sexo se produce en el momento de la fecundación. Como en el ser humano, el macho es heterogamético, es decir, produce dos clases de espermatozoides: una con un cromosoma *Y* y otra con un cromosoma *X*. Carolyn E. Murtagh y Geoff Sharman, de la Universidad de Macquarie, descubrieron que los machos de ornitorrinco y equidna diferían de los restantes mamíferos en que el sexo estaba determinado por la presencia de un complejo *XY/XX* polivalente: durante la meiosis, en el macho los cromosomas *X* e *Y* se asociaban con cromosomas autosómicos pequeños —cuatro desapareados y dos apareados.

Una vez depositada la primera lámina del cascarón, el huevo pasa al útero, donde se le añade una segunda y, absorbiendo las secreciones de las glándulas uterinas que nutren el embrión en desarrollo, aumenta de tamaño. Cuando el huevo ha alcanzado unos 12 milímetros de diámetro, se añade una tercera y última lámina a la cáscara. El huevo, ovalado, se encuentra ahora encerrado en un caparazón externo protector; en el momento de la puesta medirá aproximadamente 14 milímetros, en el ecuador, y 17 de un extremo a otro. Si bien no se conoce con exactitud cuánto dura el período de gestación, se cree que se prolonga unos 20 días.

La hembra se prepara para la puesta de los huevos construyendo una madriguera especial de nidificación, más profunda y compleja que la normal. El naturalista australiano David Fleay ha visto a una hembra preñada acarrear hierba y hojas, embutidas entre la cola y el abdomen, hasta una cámara terminal de la madriguera de nidificación, donde el material vegetal brindará humedad y acomodo a las crías.

Nunca se ha observado cómo pone los huevos, pero se supone que la hembra se sienta sobre el trasero para que los huevos, cubiertos de una secreción pegajosa, pasen directamente de la cloaca al abdomen. Acto seguido los rodea con la cola, incubándolos con el

calor del cuerpo. Aun cuando la temperatura ambiental sea de sólo 20 grados Celsius, la de la incubadora que crea la hembra se mantiene a 31.5 grados.

Tampoco se conoce lo que dura el período de incubación, pero probablemente es similar al del equidna, que se prolonga de 10 a 11 días. Se supone, asimismo, que la eclosión es idéntica en ambos animales. Las crías recién salidas del huevo son de igual tamaño en ambos casos y, como muchos reptiles, están provistas de una aguda protuberancia, o diente, en la mandíbula superior que les sirve para abrir el elástico cascarón. Cuando el equidna sale del huevo mide sólo 1,5 centímetros de largo y pesa apenas 380 miligramos. En este estadio se parece mucho a un marsupial recién nacido: las extremidades anteriores están muy desarrolladas y las posteriores son rudimentarias.

Durante el período de lactancia, las minúsculas crías permanecen firmemente apretadas contra el abdomen de la madre merced a la cola de ésta, que las envuelve. Maman la leche de dos pezones que, salvo por el pelo que los cubre, son idénticos a los de otros mamíferos. La leche se produce en un par de glándulas mamarias de un tamaño extraordinario: en una hembra que mide 43 centímetros del hocico a la cola, las glándulas de la leche pueden alcanzar casi un tercio de esa longitud, o unos 13,5 centímetros de largo.

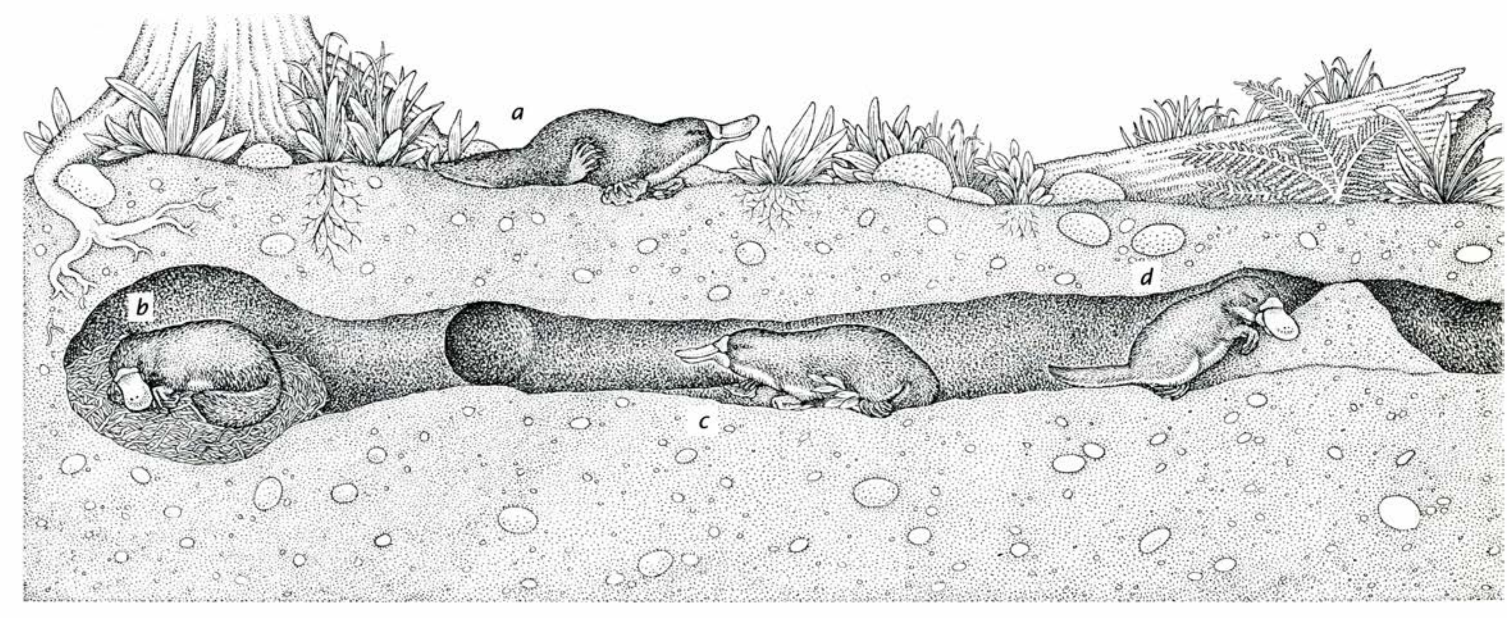
Ya en 1831, el teniente Lauderdale Maule, del XXXIX regimiento del ejército británico, demostró, con ayuda de soldados destacados en Nueva Gales del Sur, que el ornitorrinco estaba dotado de glándulas mamarias que producían leche genuina. Sin embargo, en 1959, en *Physiological Review* se publicaba que los monotremas producen un exudado graso que las crías lamen de los pelos que cubren los poros de la piel, erróneo hallazgo citado a menudo en los artículos de divulgación. Todos los interrogantes sobre la producción de leche en el ornitorrinco recibieron cumplida respuesta con la investigación que llevé a cabo con mis colegas Gutta Schoefl y Carmel Teahan, de la Universidad Nacional de Australia, Michael Messer, de la de Sidney, Robert Gibson, de la Universidad de Flinders, y Tom Grant. Nuestro trabajo ha demostrado que las glándulas mamarias del ornitorrinco se hallan tan desarrolladas como las de la mayoría de los mamíferos.

Constan de un conjunto de lóbulos claviformes, unidos por tejido conjuntivo, que convergen para constituir una masa en forma de abanico. Como en toda glándula mamaria, los lóbulos están repletos de innumerables alveolos, sáculos huecos cubiertos de una red de células mioepiteliales filamentosas. Una segunda lámina de células epiteliales tapiza el interior de los alveolos, siendo éstas las que secretan los diversos componentes lácteos. Como en otras leches, los ingredientes son caseína (la principal proteína), proteínas del suero, carbohidratos, glóbulos de grasa y sales minerales.

En respuesta a la succión ejercida sobre el pezón, la glándula pituitaria secreta la hormona oxitocina, que seguidamente entra en el torrente sanguíneo. Cuando llega a las glándulas mamarias, la oxitocina provoca la contracción de las células mioepiteliales, elevándose de ese modo la presión intraalveolar e impulsándose la leche hacia el exterior. Tal fenómeno se da en todos los mamíferos y puede desencadenarse artificialmente con inyecciones de oxitocina. A los cinco minutos de inyectarla en la hembra del ornitorrinco, sobreviene un copioso flujo de leche, que permite analizarla bioquímicamente. Dado que sólo la producen las hembras que han puesto huevos, los estudios de inducción artificial del flujo lácteo proporcionan una estimación del número de hembras reproductoras del año. Se ha comprobado de ese modo que las hembras de ornitorrinco no crían todos los años.

La leche de monotrema, como la de los marsupiales, difiere de la de los mamíferos placentarios por ser especialmente rica en hierro. Contiene de dos a tres miligramos de ese elemento por cada 100 gramos; la leche humana y la de vaca, por ejemplo, sólo contienen 0,05 milígramos de hierro por 100 gramos. Al parecer, se necesitan concentraciones tan elevadas porque el hígado del monotrema o del marsupial recién nacido es demasiado pequeño para almacenar una provisión de hierro adecuada. Durante los meses en que el único sustento es la leche, la cría tiene que satisfacer sus necesidades de hierro a expensas de la madre.

Después del destete (los pocos datos



6. ACTIVIDADES del ornitorrinco, fundamentalmente solitarias. Durante el día viven en madrigueras situadas a orillas del agua. A veces toman el sol, acicalándose con las patas traseras (*a*). La hembra guarda los huevos y las crías en una cámara de nidificación (*b*), cuyo nido construye con hojas que acarrea a la madriguera metidas entre la cola y el abdomen (*c*). Para protegerse de los depredadores, los ornitorrincos suelen tapar el extremo de la madriguera acumulando desechos (*d*). Por la noche son muy activos y se zambullen en el agua, donde se alimentan y aparean. Tras merodear en busca de comida, suelen re-

disponibles indican que tiene lugar hacia los tres meses y medio de edad), el joven ornitorrinco empieza a zambullirse en busca de alimento, muy al estilo de los adultos: agarrándolo en el fondo y almacenándolo en uno de los dos abazones. Cuando tiene ambos llenos, nada hacia la superficie, donde devuelve su contenido a la boca, triturando las presas entre las almohadillas córneas de las mandíbulas superior e inferior.

Vaciando el contenido de los abazones con una cuchara larga, Robert Faragher y un equipo del Servicio de Pesca del estado de Nueva Gales del Sur descubrieron que el ornitorrinco cambiaba de dieta según la estación del año. Hacia mediados de diciembre se alimentaba fundamentalmente de ninfas y larvas de insectos que viven en el fondo de los ríos y los lagos. Entre ellas, las larvas de frigáneas resultan, con mucho, las más corrientes. Según avanzaba el año, el porcentaje de frigáneas de la dieta disminuía y el ornitorrinco completaba su provisión alimentaria con pequeños crustáceos del tipo de la quisquilla.

Su habilidad en localizar las presas en aguas oscuras al tiempo que esquiva todo género de obstáculos resulta notable. Durante el minuto y medio que permanece bajo el agua, el ornitorrinco queda aislado del mundo exterior: los ojos y los oídos se disponen en una acanaladura muscular cuyos bordes cierra herméticamente, y las ventanas nasales, en la cara dorsal del extremo del hocico, también se cierran. En esas condiciones, ¿cómo encuentra el animal su presa?

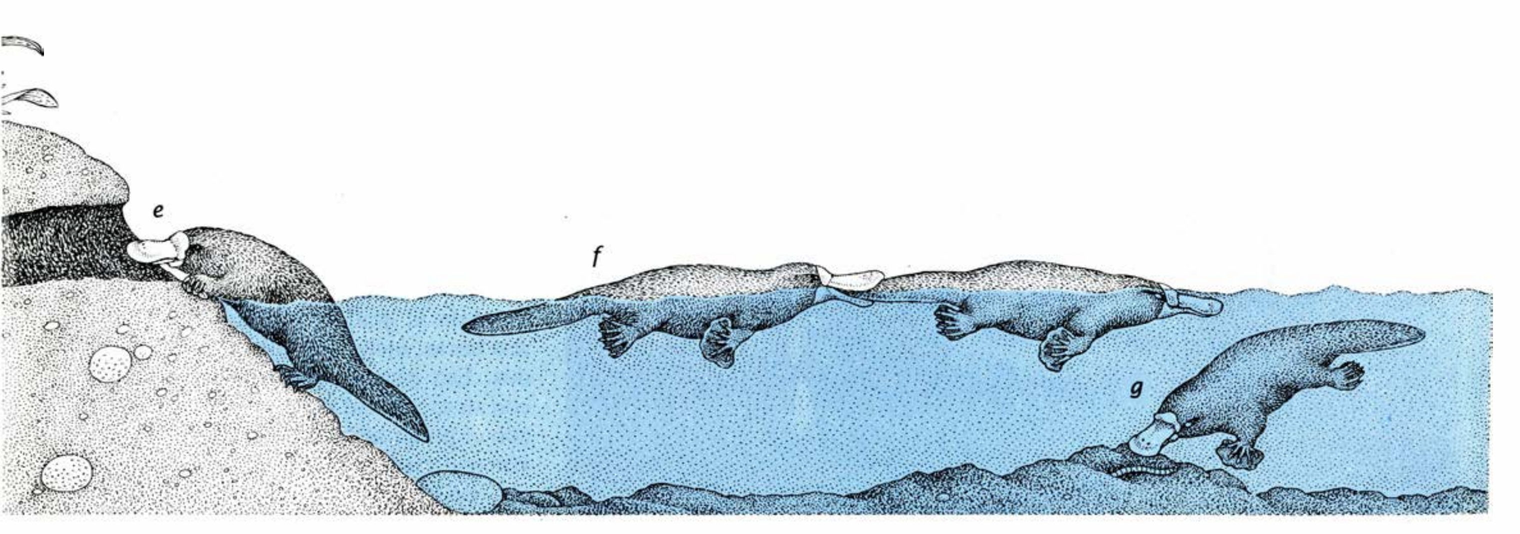
Las investigaciones recientes sobre el comportamiento alimentario del ornitorrinco han propiciado algunos hallazgos asombrosos. Desde el año 1884 se sabía que la superficie exquisitamente tersa del pico está perforada, con aberturas que contienen terminaciones nerviosas sensoriales. Las investigaciones neurofisiológicas de Ros C. Bohringer, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, Hennig Scheich, de la Universidad Técnica de Darmstadt, y Uwe Proske, de la Universidad de Monash, pusieron de manifiesto, no hace mucho, que en esos poros existen dos clases de receptores sensoriales: mecanorreceptores, una especie de minúsculos pulsadores que reaccionan a la presión táctil, y electrorreceptores, que reaccionan a los campos eléctricos débiles.

Bohringer y su colega Mark Rowe descubrieron que la estimulación táctil de los pulsadores envía impulsos nerviosos al cerebro, donde generan un potencial eléctrico en una región del neocórtex mucho mayor que la estimulada por las descargas procedentes de las extremidades, los ojos y los oídos. Concluyeron que el pico debe constituir el principal órgano sensorial del ornitorrinco. El hallazgo fue confirmado por investigaciones que demuestran que el pico es extraordinariamente sensible a los estímulos táctiles: la estimulación con una aguja fina de vidrio envía señales al neocórtex a través del quinto nervio craneano, y de allí al córtex motor. Probablemente los impulsos nerviosos del córtex motor induzcan acto seguido un movimiento de asimiento con el pico. Pero no se entiende aún cómo localiza las presas a distancia.

Scheich y sus colegas llevaron a cabo experimentos que demuestran que, cuando el ornitorrinco se alimenta, nada sin parar moviendo el pico de un lado a otro, con un cadencia de dos o tres batidas por segundo; va patrullando de ese modo hasta que se cruza con una presa. Inmediatamente después pasa a un comportamiento de búsqueda, caracterizado por movimientos erráticos del pico sobre una extensión de fondo reducida, seguidos del apuntamiento hacia el objeto y la captura del mismo con un rápido cierre de las mandíbulas.

Los experimentos demuestran que el animal localiza perfectamente los objetos en el agua, pero queda por dilucidar cómo lo consigue. ¿Cómo distingue la presa de los restantes objetos del fondo? Una serie de experimentos electrofisiológicos proporcionaron la respuesta.

Scheich y sus colegas formularon la hipótesis de un posible sistema sensorial, basado en la electrorrecepción, como el que presentan algunos peces y tiburones. Los experimentos corroboran el supuesto. Los investigadores descubrieron que podían desencadenar el tránsito del comportamiento de ronda al de búsqueda creando un campo eléctrico dipolar en el agua mediante una pequeña batería de 1,5 volt. El ornitorrinco, sensible a la débil corriente eléctrica creada, se orientaba rápidamente hacia la batería, situada a una



gresar a la madriguera para descansar (*e*). El cortejo es un complejo ritual durante el que, con frecuencia, la pareja nada en tándem: el macho agarra la hembra por la cola y juntos dan vueltas y más vueltas varios días seguidos, apareándose después (*f*); la alimentación tiene lugar esencialmente en profundidad, donde localizan las presas mediante los receptores que tienen en el pico (*g*). Agarran el alimento en el fondo y lo almacenan en uno de los abazones. La figura es una composición de comportamientos; no pretende indicar que el ornitorrinco viva en comunidad, ni que las actividades se desarrollen simultáneamente.



7. EQUIDNA ***Tachyglossus aculeatus*****, uno de los tres monotremas (mamíferos ponedores de huevos) endémicos de Australia y Nueva Guinea. A diferencia del ornitorrinco, el equidna es terrestre y se alimenta fundamentalmente de termes y hormigas, que saca de sus respectivos nidos por medio de la lengua, larga y pegajosa. Esparcidas entre el pelaje, posee espinas lisas que le confieren cierto parecido con el erizo.**

distancia de 10 centímetros y a veces hasta de 30. Una vez detectada, era inevitable que la atacara como si se tratara de alimento. Los investigadores descubrieron entonces que los golpecitos caudales de las quisquillas de agua dulce producen también campos eléctricos débiles y desatan idéntica respuesta. La hipótesis consiguiente era que todos los invertebrados que forman parte de la dieta del ornitorrinco deben hacer lo mismo.

Pero seguían sin conocerse los medios de que se valía el ornitorrinco para detectar corrientes eléctricas débiles. Scheich y su equipo sometieron el pico del animal a un estímulo eléctrico, evidenciándose, en experimentos de potencial inducido, que la región cerebral estimulada era una zona del neocórtex contigua a la estimulada por los mecanorreceptores. Es más, se encontró que la sensibilidad máxima se registraba en algunos poros, no en todos, de la piel del pico.

Proske y su equipo descubrieron que los receptores del interior de esos poros eran insensibles al tanteo con una aguja de vidrio, pero reaccionaban ante estímulos eléctricos de baja intensidad. Y a la inversa, los mecanorreceptores, extraordinariamente sensibles al tacto, sólo reaccionaban eléctricamente cuando se aplicaba una corriente de tres órdenes de magnitud superior.

El examen detenido de los poros en una sección transversal reveló que, en efecto, aparecían, asociadas con glándulas que secretaban moco, terminaciones nerviosas sensibles a las corrientes eléctricas. Al parecer, la lubricación que proporcionan las glándulas garantiza que los electrorreceptores no se sequen cuando el ornitorrinco se encuentra escondido en la madriguera.

Otra extraordinaria especialización del ornitorrinco es su capacidad termorreguladora, más efectiva que en algunos mamíferos placentarios. Grant y sus colegas han descubierto que, a pesar de las similitudes con los reptiles de sangre fría, el ornitorrinco es un termorregulador excelente, tanto en condiciones naturales como de laboratorio. Cuando busca alimento en invierno, ha de enfrentarse con aguas que pueden alcanzar temperaturas próximas a cero grados Celsius; sin embargo, como cualquier otro mamífero, mantiene la temperatura normal del cuerpo (que en su caso es de 32°) mediante el ajuste de la tasa metabólica. Cuando la temperatura del aire baja de 25 a 5° Celsius, el ornitorrinco multiplica la tasa metabólica estándar (TME) por 1,8; en agua a cinco grados la multiplica por un factor de 3,2.

Comprobamos, para nuestra sorpresa, que mantenía una temperatura corporal de 32 grados Celsius durante varias horas, incluso en aguas a cero grados. Esa peculiaridad guarda relación con su capacidad de aumentar la TME y con el poder aislante de su pelaje, mayor que en la mayoría de los mamíferos. En el agua, la piel de castor o de oso polar, por ejemplo, pierde del 90 al 96 por ciento de su poder aislante; en comparación, la de ornitorrinco sólo pierde del 60 al 70 por ciento. Los ma-



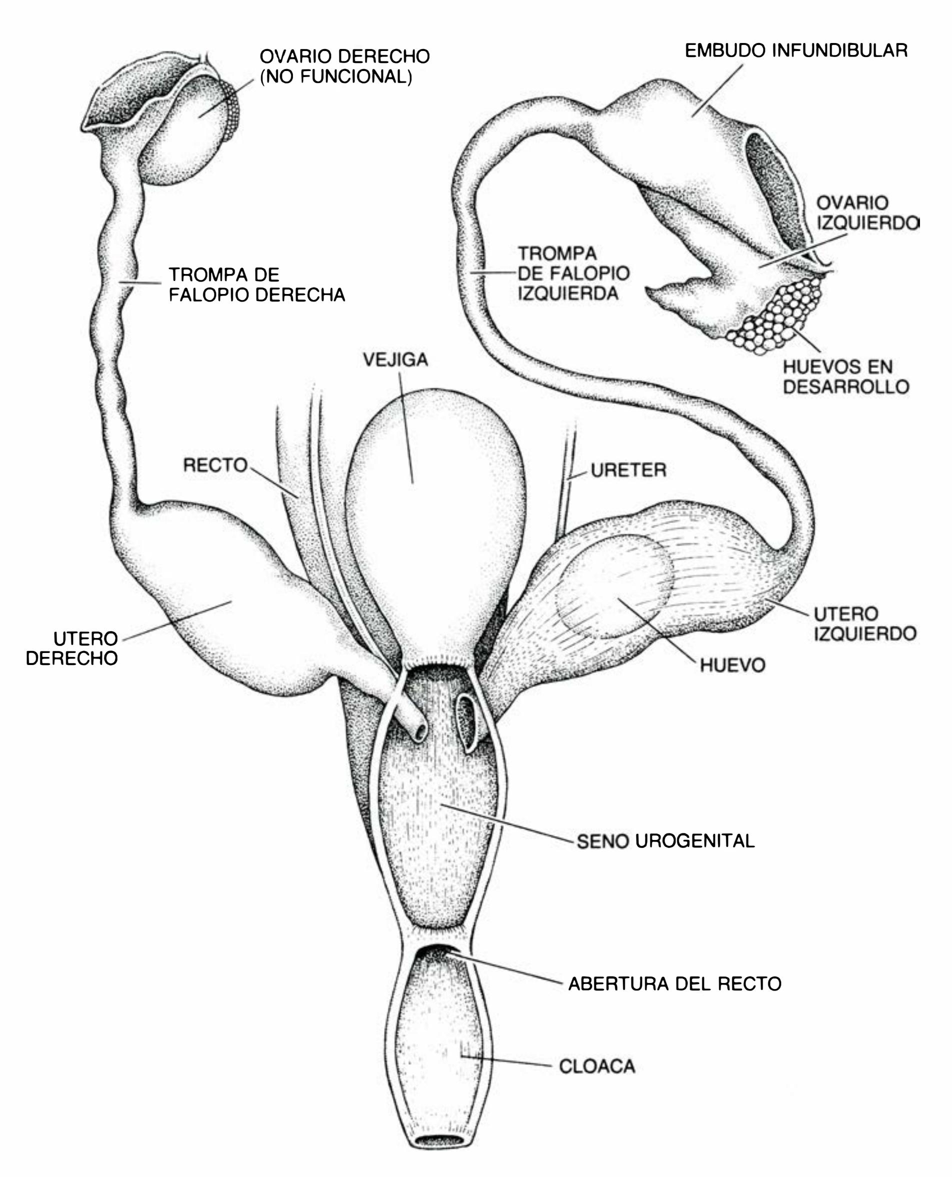
8. LOS MONOTREMAS, en este caso un equidna, abandonan el huevo a los 10 días de incubación, cuando apenas pesan 400 miligramos. Los recién nacidos poseen un diente duro en el extremo de la mandíbula superior, con el que desgarran el elástico cascarón del huevo. Algunos reptiles presentan un diente similar.

míferos placentarios anfibios, como la rata almizclada (*Ondatra zibethicus*) y la rata de agua australiana (*Hydromys chrysogaster*), son, en comparación, malos termorreguladores. En agua a cinco grados Celsius, la temperatura interna de la rata de agua disminuye, en cuestión de unas horas, de 37 a 28°.

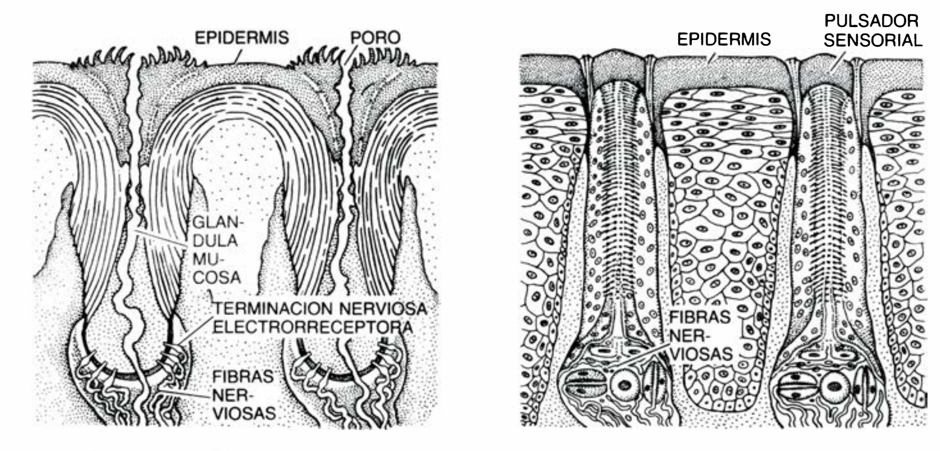
A pesar de lo que se sabe ya sobre el ornitorrinco, sigue sin resolverse el misterio de su antigüedad. La insólita mezcla de caracteres reptilianos y de mamífero apunta a una dilatada historia evolutiva, quizá de hasta 150 millones de años. Sin embargo, el registro fósil del animal es notoriamente pobre. Cabe atribuir tal situación, al menos en parte, a la falta de dientes del ornitorrinco adulto. (La mayoría de los mamíferos están representados en el registro fósil por dientes y mandíbulas.)

Pero en los últimos años han aparecido restos fósiles especialmente curiosos. En primer lugar, Michael Archer y sus colegas, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, descubrieron un cráneo maravillosamente conservado de individuo adulto en un yacimiento miocénico de unos 15 millones de años, en el noroeste de Queensland. El cráneo, correspondiente a la especie *Obdurodon dicksoni*, reviste particular interés porque posee dientes similares en algunos aspectos a los de los ornitorrincos jóvenes. El hallazgo lleva a pensar que la pérdida de los dientes debió constituir, en ese grupo, un acontecimiento reciente. En 1985, Archer, Timothy F. Flannery, Alex Ritchie y Ralph E. Molner descubrieron un fragmento de mandíbula inferior con tres molares, similares a los de *Obdurodon*, en un yacimiento que se supone correspondiente al Cretácico inferior, de una antigüedad de unos 100 millones de años. La importancia del fósil, clasificado como *Steropodon galmani*, reside en que sienta una fecha mínima para la edad de los monotremas y en que es el primer indicio de que había mamíferos en Australia mucho antes del Terciario.

Quedan por resolver muchos de los interrogantes que plantean el ornitorrinco y sus hábitos. La investigación sobre el animal no ha cesado (se trabaja hoy en la bioquímica de la lactación y la endocrinología de la reproducción), pero resulta ya evidente —no obstante su antigüedad y el mosaico de características reptilianas y de mamífero— que el ornitorrinco es un animal muy especializado, perfectamente adaptado a la vida anfibia en los cursos de agua del este de Australia.



9. APARATO REPRODUCTOR de los monotremas, que es único entre los mamíferos: su anatomía tiene más de reptil que de mamífero. El ovario izquierdo (el derecho no es funcional) deposita los huevos en la trompa de Falopio, donde se produce la fecundación. De ahí pasan al útero, donde adquieren un cascarón elástico, y salen al exterior por la cloaca. Como en los reptiles, el recto y la vejiga se abren en la cloaca; todos los mamíferos placentarios realizan las funciones excretora y reproductora por aberturas separadas.



10. RECEPTORES SENSORIALES del pico que permiten al ornitorrinco orientarse y localizar las presas bajo el agua. Los electrorreceptores (*izquierda*) reaccionan ante las débiles corrientes eléctricas generadas por el movimiento de los pequeños invertebrados bentónicos; estimulados los electrorreceptores, el animal nada hacia la señal. La estimulación táctil por parte de la presa provoca el disparo de los mecanorreceptores (*derecha*); el pulsador sensorial se deforma y envía un estímulo nervioso hacia el cerebro, de lo que se sigue el movimiento de cierre del pico y la captura de la presa. (Los dibujos son obra de Patricia J. Wynne.)

Luz comprimida

La precisión de las mediciones está limitada por el ruido cuántico de las ondas luminosas. Para salvar el escollo se hace más silenciosa una parte de la onda a costa de incrementar el ruido, o fluctuaciones, de la otra

Richart E. Slusher y Bernard Yurke

Luz silenciosa. ¿Habrá alguna vez un haz realmente "silencioso", es decir, libre de las fluctuaciones aleatorias que conocemos como ruido? ¿Se hallan los físicos condenados a acometer sus observaciones y medidas con luz imperfecta y ruidosa? Después de todo, la teoría cuántica establece que toda luz debe ir acompañada de una cantidad mínima de fluctuación que limita la precisión fundamental de las observaciones realizadas con haces luminosos. Ello no obstante, parece quedar un resquicio para la esperanza. Varios grupos de investigadores, incluido el nuestro, han descubierto que algunas veces se puede "comprimir" el ruido de un haz luminoso: redistribuirlo de suerte tal que unas partes de la onda luminosa sean menos ruidosas que antes, aunque otras vean potenciadas sus fluctuaciones. La onda resultante puede utilizarse en mediciones de alta precisión.

Un haz de luz consiste en un campo electromagnético oscilante. Desde la óptica de la física clásica, las oscilaciones del campo se ilustran a través de una onda suave, cuya forma puede describirse con absoluta certeza. Ahora bien, según el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, tal certeza es inalcanzable; lo máximo que podemos afirmar es que la forma de la onda encaja dentro de cierto "margen" de incertidumbre. Esta se manifiesta como ruido: pequeñas fluctuaciones aleatorias del campo electromagnético.

De acuerdo con la mecánica cuántica, habrá cierta cantidad de ruido incluso en la "oscuridad", en ausencia de toda otra luz; en virtud de la física clásica, la onda que representa la oscuridad sería plana, sin ondulaciones (en cierto sentido ni siquiera sería una onda). Por contra, la mecánica cuántica sólo permite avanzar que la onda es plana dentro de un pequeño grado de incertidumbre; dentro de ese margen, la onda fluctúa al azar. En la práctica, esto significa que incluso en el vacío, sin fuentes externas de luz, habrá pequeñas fluctuaciones del campo electromagnético.

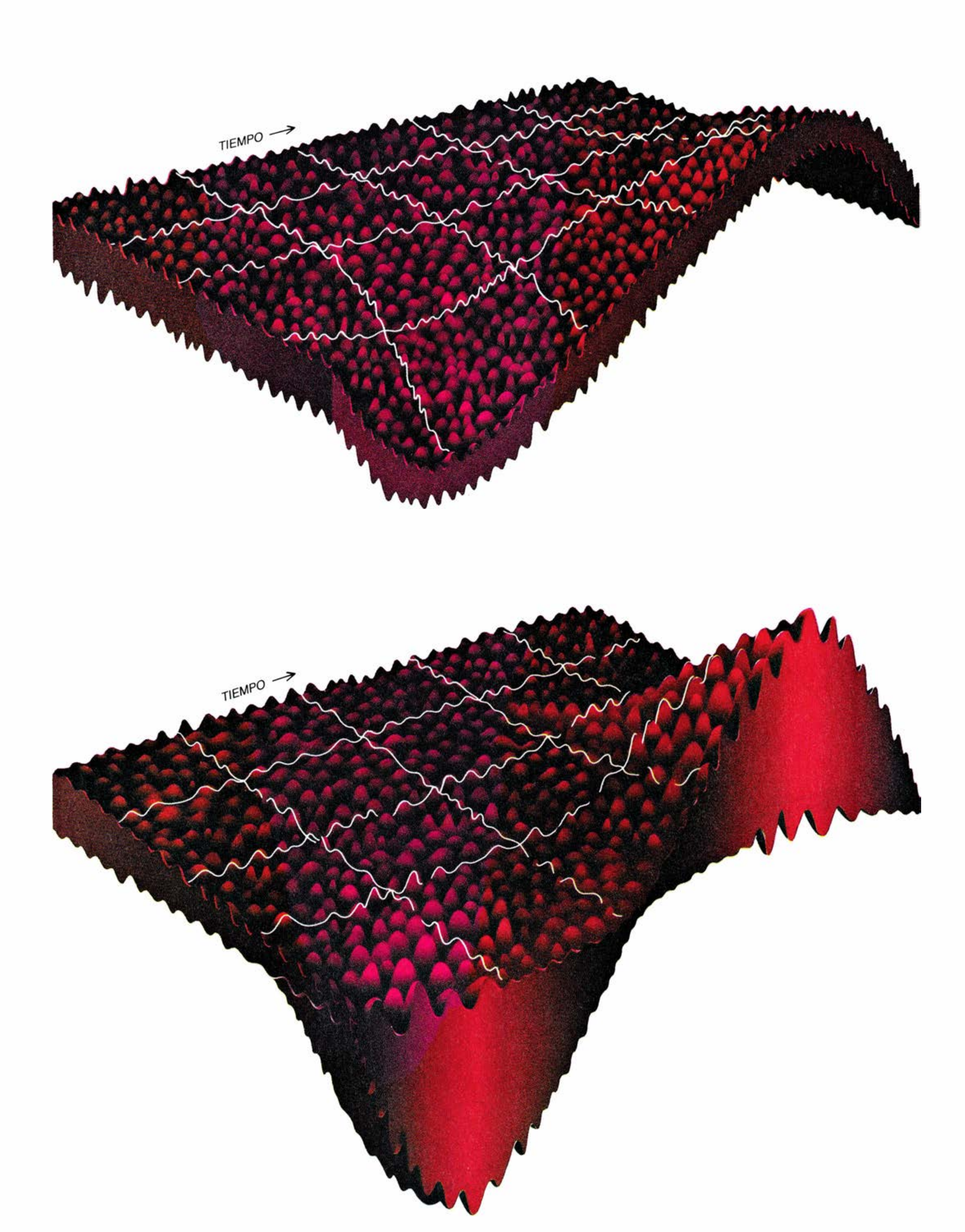
Esas fluctuaciones del vacío constituyen, hasta cierto punto, la causa de las fluctuaciones de los haces de luz ordinarios. La onda que representa un haz de luz vendría a ser las fluctuaciones del vacío, difusas e irregulares, superpuestas a la onda suave que describe la física clásica. Podríamos afirmar que la interferencia con las fluctuaciones del vacío determina que las ondas luminosas ordinarias tengan ruido.

El ruido limita de manera decisiva el grado de precisión posible de las mediciones en que interviene la luz. Restringe, por ejemplo, la precisión de los interferómetros que calibran las figuras de interferencia producidas por haces de luz que se han reflejado sobre objetos de masa apreciable y se han combinado después; tales interferómetros, que detectan cambios muy pequeños en las posiciones relativas de los reflectores masivos, forman parte de dispositivos diseñados para detectar ondas gravitatorias. El ruido también limita la precisión de la espectroscopía, técnica en la que frecuencia e intensidad de la radiación emitida por átomos o moléculas proporcionan información acerca de sus propiedades. Por último, el ruido cuántico frenará también la capacidad de la computación y la comunicación ópticas.

La luz comprimida proporciona un camino para evitar alguna de estas limitaciones. El ruido que dificulta tales mediciones puede comprimirse en algunas partes de un haz de luz o, más directamente, en el propio vacío mecánico-cuántico. De la compresión del vacío resulta un haz que se propaga y que, en un sentido especial, contiene menos fluctuaciones que un vacío absoluto: un haz de "luz" que es más oscuro que la misma oscuridad. Acometiendo observaciones con un haz de luz comprimida y un detector que sólo ve la parte comprimida de la onda luminosa, y no la parte ruidosa, se pueden realizar mediciones con mayor precisión que la que se obtiene bajo las restricciones impuestas por el principio de incertidumbre. (La verdad es que no hay violación del principio de incertidumbre; las necesarias incertidumbres se redistribuyen en el tiempo.)

¿Cómo logra el experimentador comprimir la luz? Para desentrañar los mecanismos involucrados, recurriremos a una analogía física. En algunos aspectos, las oscilaciones del campo electromagnético semejan los movimientos de un columpio de un parque infantil. Al igual que los movimientos de una onda luminosa, las oscilaciones del columpio poseen una determinada frecuencia (el número de ciclos, o trayectorias completas, que el columpio hace en un tiempo dado) y una amplitud (la altura que el columpio alcanza en cada ciclo). El movimiento relativo de dos niños columpiándose, como el de dos ondas luminosas, se expresa mediante su fase relativa: se dice que los niños se columpian en fase, si en cada ciclo ambos alcanzan la parte más alta de su movimiento en el mismo instante. Están defasados en mayor o menor grado si alcanzan la parte más alta en instantes diferentes.

Supongamos que un niño decide impulsar su columpio de una manera poco convencional. En vez de inclinarse hacia atrás y después hacia delante una vez por ciclo (la manera acostumbrada de darse impulso), decide ponerse de pie en el asiento o agacharse a tiempos distintos del ciclo del columpio. Si se agacha cuando el columpio se acerca a la parte más alta de su movimiento, y está de pie cuando el columpio queda más cerca del suelo (haciendo por tanto trabajo contra la fuerza centrífuga), añadirá energía al movimiento del columpio y ampliará la oscilación: el co-



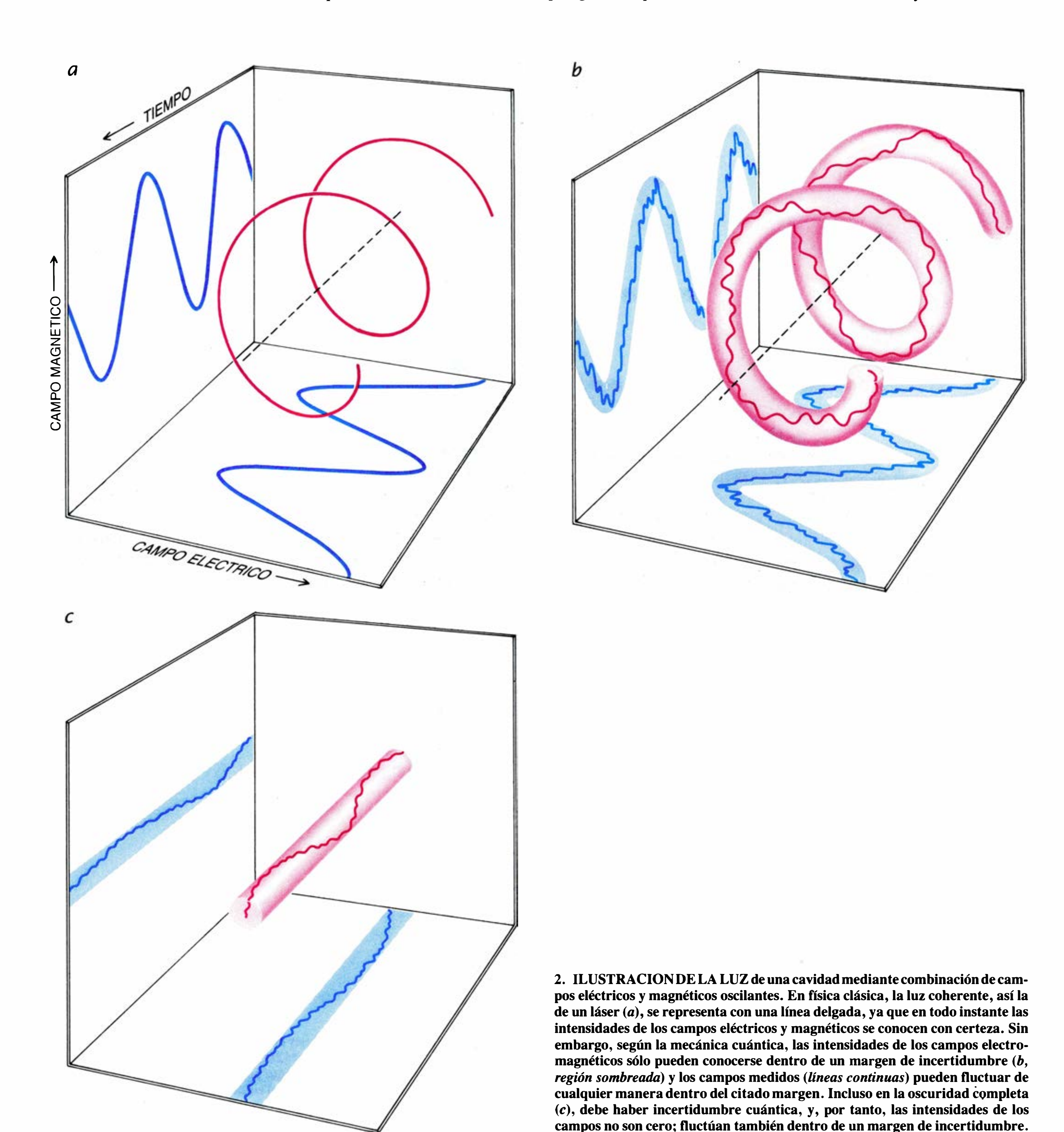
1. RUIDO CUANTICO: expresión que designa la fluctuación aleatoria impuesta por las leyes de la mecánica cuántica. Dicho ruido socava la precisión de las ondas luminosas. Las dos formas representadas aquí corresponden a ondas luminosas. El ruido inherente a las ondas se refleja en su espesor e irregularidad; si no hubiera ruido, las ondas luminosas se representarían mediante láminas suaves bidimensionales. En la luz láser ordinaria (*arriba*), el ruido es uniforme en toda la onda. El ruido uniforme está también presente en la oscuridad existente fuera del haz láser (simbolizada aquí por la parte plana de la forma irregular). En la luz "comprimida" (*abajo*), el ruido ha sufrido una manipulación: parte de la onda es menos ruidosa (más delgada y más suave en esta figura).

lumpio subirá más en cada ciclo. Por contra, si el niño se agacha cuando el columpio está próximo al suelo y se pone de pie cuando se eleva, disminuirá el movimiento del columpio y no subirá tanto en cada ciclo subsiguiente.

Para nuestra analogía, el movimiento impulsor del niño ofrece dos aspectos importantes. En primer lugar, el niño se levanta y se agacha dos veces en cada oscilación completa del columpio. Expresado en términos más técnicos, la frecuencia de la acción impulsora duplica la frecuencia del movimiento del columpio. El segundo aspecto de interés reside en el movimiento del columpio, que puede ampliarse o restringirse según sea la fase relativa de erguirse y encogerse (es decir, depende de que el niño se ponga de pie o se agache en la parte superior del ciclo).

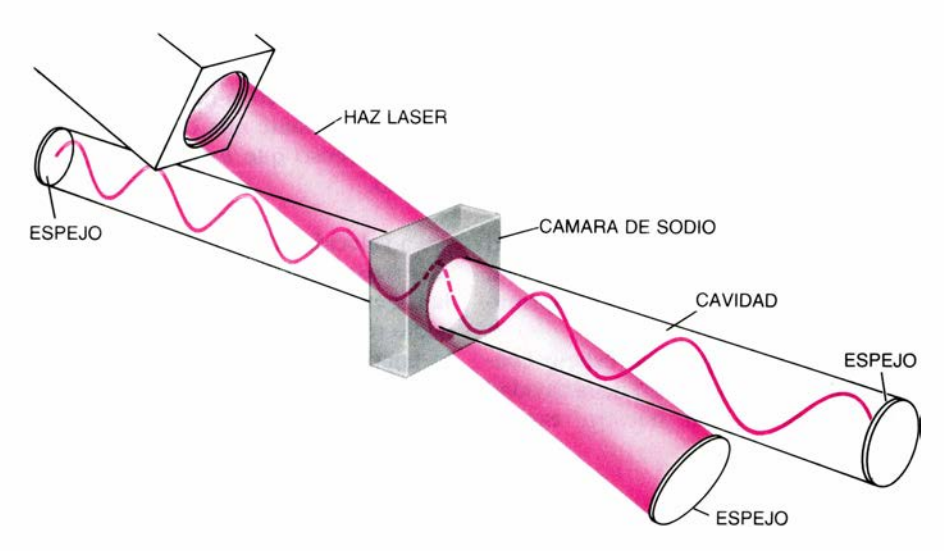
Puede aplicarse una clase similar de impulso a una onda luminosa confinada en una cavidad dotada de espejos en ambos extremos. Supongamos que la profundidad de la cavidad sea múltiplo exacto de la longitud de onda de la luz: en el recinto cabe un número entero de longitudes de onda. Cuando se refleja en cada extremo de la cavidad, la onda confinada interfiere consigo mismo y resuena, formando una onda estacionaria; el proceso se asemeja a la onda sonora que resuena en un tubo de órgano.

Supongamos ahora que fuera posible mover el espejo de un extremo de la cavidad, hacia delante y hacia atrás



2. ILUSTRACION DE LA LUZ de una cavidad mediante combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes. En física clásica, la luz coherente, así la de un láser (*a*), se representa con una línea delgada, ya que en todo instante las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos se conocen con certeza. Sin embargo, según la mecánica cuántica, las intensidades de los campos electromagnéticos sólo pueden conocerse dentro de un margen de incertidumbre (*b, región sombreada*) y los campos medidos (*líneas continuas*) pueden fluctuar de cualquier manera dentro del citado margen. Incluso en la oscuridad completa (*c*), debe haber incertidumbre cuántica, y, por tanto, las intensidades de los campos no son cero; fluctúan también dentro de un margen de incertidumbre.

(cambiando, por tanto, la longitud de la cavidad), con una frecuencia exactamente doble de la frecuencia de la onda luminosa. Cambiando la longitud de la cavidad de manera regular añadiríamos o sustraeríamos energía de la onda luminosa conforme se fuera reflejando en el espejo. Igual que el movimiento impulsor del niño, la vibración del espejo amplificaría o disminuiría la onda luminosa en función de la fase relativa de la vibración del espejo y de la oscilación de la onda luminosa. Si el movimiento del espejo tiene la fase correcta, con respecto a la oscilación de la onda luminosa, la onda se amplifica: el campo electromagnético oscilante adquiere mayor intensidad. Si el movimiento del espejo tiene la fase complementaria, la onda disminuye y el campo electromagnético oscilante se debilita.



3. INGENIO para comprimir la luz, que se funda en una cavidad que tiene espejos en ambos extremos. La longitud de la cavidad es un múltiplo exacto de la longitud de onda de la luz que se ha de comprimir, por cuya razón la luz resuena dentro de la cavidad y forma un conjunto de ondas estacionarias. En el interior del recinto (*centro*), se coloca una cámara de sodio gaseoso; se dirige un haz láser hacia el gas. El haz láser se refleja sobre sí mismo mediante un espejo (*inferior derecha*), formando otra onda estacionaria (no representada) dentro de la cámara de sodio. Esta onda provoca rápidas variaciones de las propiedades ópticas del sodio y, por tanto, rápidas variaciones en el tiempo que la luz tarda en atravesar la cavidad. Debido a ello, algunas de las ondas que resuenan dentro de la cavidad se amplifican, mientras que otras se amortiguan. El resultado es un aumento de la cantidad total de ruido en algunas partes de la luz y una disminución en otras.

Volviendo a nuestra analogía, imaginemos ahora un parque entero lleno de niños, todos columpiándose. Lo hacen con idéntica frecuencia, aunque no están en fase: en cualquier instante que consideremos, unos niños pueden hallarse cerca de la parte alta de su ciclo y otros próximos al suelo. Supongamos que el maestro llega al parque, toma un megáfono y, con una frecuencia exactamente doble de la frecuencia de los columpios, se pone a gritar: "de pie ... agachados ... de pie ... agachados ...". Habrá niños que estarán en la parte más baja de su ciclo, o cerca de ella, cada vez que el maestro ordena "de pie"; otros se hallarán en la parte de arriba o cerca de ella. Los que se encuentren cerca de la parte inferior del ciclo amplificarán el movimiento de sus columpios, mientras que quienes se hallen cerca de la parte superior disminuirán el movimiento de los suyos.

Por último, los niños que estén cerca de la parte inferior del ciclo se columpiarán con una amplitud mucho mayor que antes; quienes se encontraban cerca de la parte superior del ciclo apenas si se columpiarán. En el parque habrá entonces niños que llegarán muy alto en su balanceo —y que se columpian casi exactamente en fase entre sí y con las órdenes dadas por el maestro— y otros niños que apenas si basculan, a pesar de que continúen levantándose y agachándose.

Ahora bien, el ruido del vacío en una cavidad (el ruido que se presenta incluso en la oscuridad) guarda un estrecho parecido con el parque lleno de niños columpiándose al azar. El ruido del vacío puede imaginarse formado por muchas ondas, todas de la misma frecuencia, aunque con amplitudes y fases aleatorias. Cuando todas estas ondas se suman, producen la onda incierta y difusa del ruido del vacío.

Si las múltiples ondas que forman el ruido del vacío son análogas a los niños de los columpios, ¿qué componente de la cavidad se asociará al maestro? Tal papel lo desempeña el espejo vibrante. Recuérdese que el espejo amplifica todas las ondas que poseen cierta fase con respecto a su vibración y amortigua todas las ondas que portan la fase complementaria. Por consiguiente, el espejo amplificará algunas componentes del ruido del vacío y reducirá otras. Finalmente, el ruido producido dentro de la cavidad consistirá en ondas de notable amplitud que se hallan casi en fase entre sí (y con la vibración del espejo), y en otras ondas, con amplitudes extraordinariamente bajas, que se encuentran desfasadas de las ondas de gran amplitud. Esta combinación de ondas se denomina estado comprimido: el ruido del vacío se ha comprimido, pasándolo de unas fases a otras.

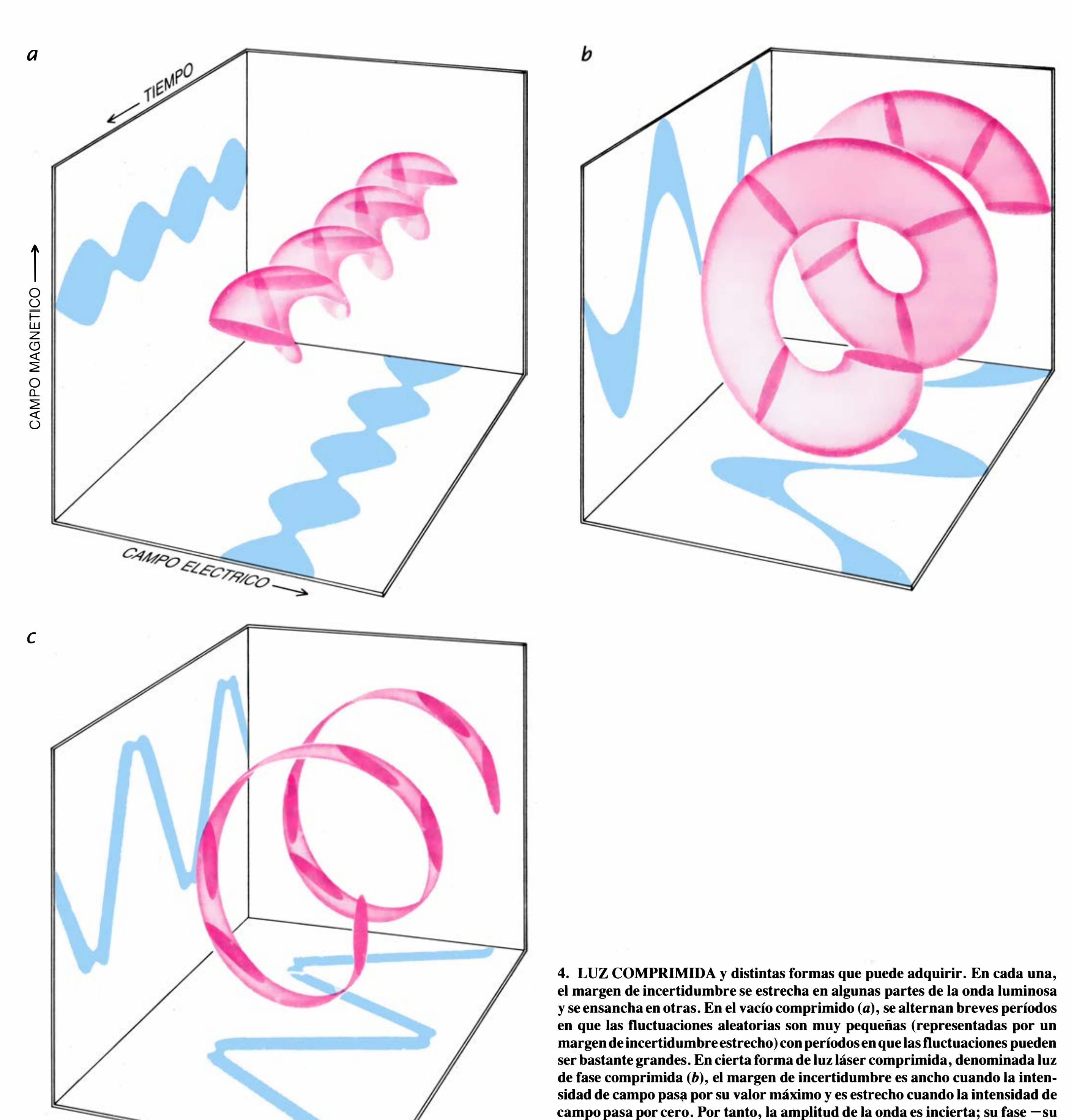
El ruido del vacío comprimido difiere esencialmente del ruido ordinario. El ruido ordinario es una constante difusión de incertidumbre; por otro lado, en el estado comprimido, la cantidad de ruido aumenta y disminuye de manera periódica. Para descubrir la razón de ello, fijémonos sólo en una de las ondas componentes y comparémosla con un niño de los columpios. En un ciclo del columpio, el niño pasa de una posición cercana al suelo a una posición frontal alta, baja de nuevo a una posición cercana al suelo, sube a una posición dorsal alta y baja de nuevo a una posición cercana al suelo. En la cavidad, la onda representa oscilaciones del campo electromagnético. Igual que la posición del niño en relación al columpio, la intensidad del campo electromagnético durante un período de la onda va desde cero hasta algún valor máximo, vuelve a cero, baja hasta algún valor máximo negativo y torna de nuevo a cero.

Hay momentos, en cada ciclo de la onda, en los que la intensidad de campo pasa por cero. En el estado comprimido, todas las ondas que forman el ruido se hallan aproximadamente en fase; así, pues, todas pasan aproximadamente por cero en el mismo instante. Significa ello que la intensidad de campo en la cavidad (la suma de los campos representados por todas las ondas) será periódicamente muy baja, como si apenas hubiera ruido electromagnético. Entre estos instantes, la intensidad del campo será muy elevada, ya que todas las ondas alcanzan, a la vez, su amplitud máxima positiva o negativa. Así, el estado comprimido consiste en instantes de lo que parece ser un ruido muy bajo, alternando con instantes de lo que parece ser un ruido muy alto. Expuesto de otra manera, el vacío comprimido se representa con una onda formada por regiones alternantes de fluctuaciones de baja amplitud y fluctuaciones de amplitud elevada [*véase la figura 4*]. El margen de incertidumbre en que se mueve el campo se ha reducido en las primeras regiones y se ha ensanchado en las últimas.

Nuestra analogía parece pedir demasiado al "maestro": el espejo vibrante. La verdad es que no se puede hacer vibrar un espejo a las elevadas frecuencias que son necesarias. Sin embargo, los autores y sus colaboradores de los laboratorios AT&T Bell han utilizado un mecanismo, que produce el mismo efecto que el hipotético espejo, para generar la primera luz comprimida jamás observada.

El papel del hipotético espejo consistía en variar la longitud de la cavidad periódicamente. En nuestro experimento, no modificamos la longitud real de nuestra cavidad; sí variamos la longitud óptica efectiva de la cavidad. Lo hicimos mediante una cámara llena de sodio gaseoso que introdujimos en el recinto.

La velocidad de la luz en el sodio gaseoso es menor que la velocidad de la luz en el vacío porque los átomos de sodio retienen temporalmente parte de la energía de la luz cuando ésta atraviesa el gas. Así, un haz luminoso tarda más en cubrir determinado recorrido a través del sodio gaseoso que en cubrir una trayectoria equivalente en el vacío; en cierto sentido, la trayectoria a través del sodio viene a ser ópticamente "más larga". Ahora bien, podemos aumentar la velocidad de la luz en el sodio gaseoso "excitando" el gas con un láser de la frecuencia adecuada. Los átomos de sodio excitados tienen una menor probabilidad de retener energía de una onda luminosa, y así la luz viaja más deprisa a través del sodio excitado que a través del sodio sin excitar. Por tanto, el recorrido a través del sodio gaseoso



4. LUZ COMPRIMIDA y distintas formas que puede adquirir. En cada una, el margen de incertidumbre se estrecha en algunas partes de la onda luminosa y se ensancha en otras. En el vacío comprimido (*a*), se alternan breves períodos en que las fluctuaciones aleatorias son muy pequeñas (representadas por un margen de incertidumbre estrecho) con períodos en que las fluctuaciones pueden ser bastante grandes. En cierta forma de luz láser comprimida, denominada luz de fase comprimida (*b*), el margen de incertidumbre es ancho cuando la intensidad de campo pasa por su valor máximo y es estrecho cuando la intensidad de campo pasa por cero. Por tanto, la amplitud de la onda es incierta; su fase —su ritmo— resulta, en cambio, bastante preciso por serlo también el momento en que la onda pasará por el inicio de su ciclo. En la luz de amplitud comprimida (*c*), aunque la amplitud es relativamente precisa, la fase fluctúa mucho.

excitado es ópticamente más corto que otro recorrido a través del sodio sin excitar. En consecuencia, un láser puede permitirnos realizar cambios rápidos de la longitud óptica de la cámara de sodio de nuestra cavidad y, por tanto, de la longitud óptica efectiva de dicho recinto.

Para comprimir las fluctuaciones del vacío de nuestra cavidad, dirigimos entonces un haz de láser, en ángulo oblicuo, hacia la cámara de sodio. Un espejo reflejaba el haz láser sobre sí mismo, formando una onda estacionaria. La onda estacionaria excitaba periódicamente los átomos de la cámara de sodio. Habíamos dispuesto el aparato de suerte que la frecuencia con la que la onda estacionaria excitaba los átomos de sodio duplicaba exactamente la frecuencia de las fluctuaciones del vacío que queríamos comprimir.

Se producía el mismo efecto que si hubiéramos movido hacia delante y hacia atrás, a la frecuencia correcta, uno de los espejos de los extremos de la cavidad resonante: el cambio periódico de la longitud óptica de la cavidad comprimía las fluctuaciones del vacío. El espejo de uno de los extremos de la cavidad sólo estaba parcialmente plateado, de manera que alrededor de un dos por ciento de la luz que incidía sobre él salía de la cavidad y formaba un haz de luz comprimida. Se procuró que el espejo del otro extremo alcanzara el máximo poder reflector, a fin de evitar que las fluctuaciones del vacío no comprimidas entraran en la cavidad.

La técnica que utilizamos para comprimir las fluctuaciones del vacío constituye un ejemplo de una técnica más general, conocida como mezcla de cuatro ondas o conjugación de fase óptica [véase "Aplicaciones de la conjugación de fase óptica", por David M. Pepper; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1986]. Los primeros investigadores que sugirieron que la mezcla de cuatro ondas podía comprimir la luz fueron Horace Yuen y Jeffrey H. Shapiro, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Aunque utilizamos sodio gaseoso como medio activo de nuestro aparato, la mezcla de cuatro ondas puede fundarse en cualquier material óptico no lineal: gaseoso, líquido o sólido cuyas propiedades ópticas varíen en función de la cantidad de luz que lo atraviesa. Citemos, a modo de ejemplo, fibras de vidrio, polímeros orgánicos y semiconductores tales como el arseniuro de galio.

Tras nuestro experimento, otros investigadores comprimieron también las fluctuaciones del vacío. Ling-An Wu, H. Jeffrey Kimble, John Hall y Huifa Wu, de la Universidad de Texas en Austin, han aportado la demostración más espectacular hasta la fecha. Emplearon, de medio activo, un cristal de niobato de litio y lo bombearon con un láser verde a la frecuencia correcta para comprimir las fluctuaciones en la parte infrarroja cercana del espectro. Recientemente han logrado reducir el ruido en una parte de la onda hasta en un 70 por ciento. El correspondiente incremento de ruido en la otra parte de la onda no fue mayor de lo que cabía esperar según el principio de incertidumbre. Su habilidad para reducir más todavía el ruido sólo estaba limitada por las imperfecciones de las componentes ópticas de su aparato.

Otro resultado interesante se lo debemos a Robert M. Shelby, Marc D. Levenson, S.H. Perlmutter, Ralph G. DeVoe y Dan F. Walls, de los laboratorios de investigación Almaden de IBM: han comprimido fluctuaciones en una fibra óptica y no ya en una cavidad resonante convencional. Si bien lograron sólo una reducción del ruido de alrededor de un 13 por ciento por culpa de la dispersión y absorción de la luz en el vidrio de la fibra.

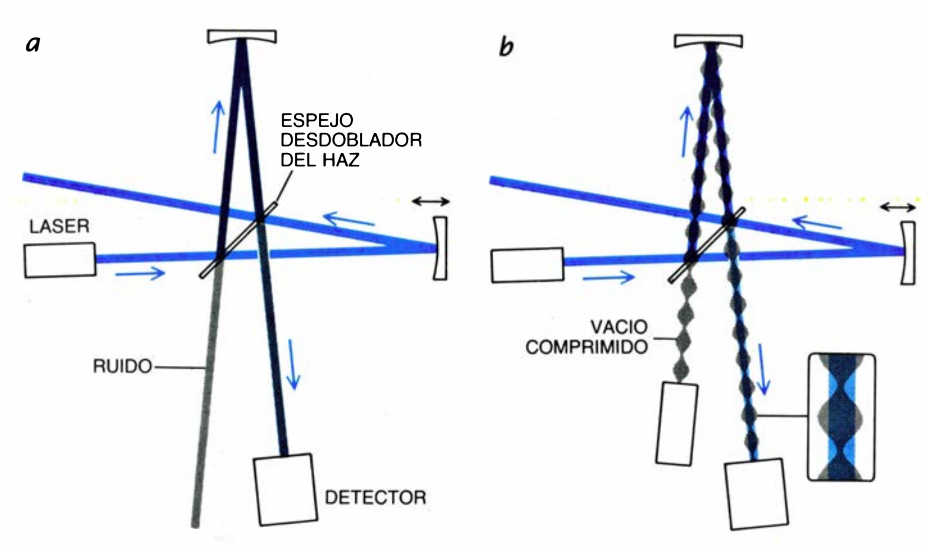
Una vez comprimida la luz, ¿cómo detectarla? ¿Cómo puede el experimentador comprobar que ha comprimido realmente las fluctuaciones del vacío? El diseño de un detector de luz comprimida presenta dos dificultades características. En primer lugar, el detector debe operar sin añadir ruido a una señal tan sutil. En segundo lugar, el detector de luz comprimida ha de poder dirigirse sólo a una parte de la luz que emerge de la cavidad. Recordemos que el vacío comprimido consiste en una serie alternante de fluctuaciones de gran y de pequeña amplitud. Los fotodetectores convencionales registrarían las fluctuaciones de gran amplitud, oscureciendo los breves momentos en que las fluctuaciones fueran menores que el ruido del vacío.

Nuestro detector resulta excesivamente complejo para describirlo en todos sus pormenores; pero daremos una breve explicación de los principios en los que se basa. Un elemento clave del detector es un haz de luz láser de gran amplitud llamado oscilador local. El haz del oscilador local es, de hecho, una parte del haz láser que "bombea" la cámara de sodio, por lo que tiene la misma frecuencia que la luz comprimida que emerge de la cavidad. La propia luz comprimida, cuando emerge de la cavidad, se divide en dos haces mediante un espejo semiplateado. El haz del oscilador local se dirige hacia el espejo semiplateado, y se desdobla, a su vez, en dos haces, cada uno de los cuales se combina con uno de los haces de luz comprimida. Resultan así dos haces distintos, formado cada uno por un haz de luz comprimida y combinado con un haz del oscilador local. Cada haz combinado incide entonces sobre un fotodetector y genera una señal electrónica.

Los fotodetectores miden sólo la amplitud de cualquier onda luminosa que incida sobre ellos. Se limitan, pues, a indicar la magnitud del "pico" de la onda. La onda del oscilador local tiene una amplitud mucho mayor que la onda de la luz comprimida; la forma de la onda combinada –incluida la localización de su pico– queda así determinada, sobre todo, por la onda del oscilador local. El pico constituye la única parte de la onda combinada que el detector examina; por consiguiente, la única parte de la onda de luz comprimida que ejerza algún efecto sobre lo que registre el fotodetector será aquella que venga a coincidir con el pico de la onda del oscilador local. Así, pues, la función de la onda del oscilador local consistirá en determinar qué parte de la onda comprimida logra quedar registrada por el fotodetector; dicho de otra manera, se trata de conectar el fotodetector sobre un segmento determinado del ciclo.

Después de que las ondas combinadas incidan sobre los fotodetectores, las señales de los dos fotodetectores se conjugan electrónicamente para substraer la amplitud del oscilador local. Este procedimiento cancela también todas las fluctuaciones que pudiera haber en el haz del oscilador local. Lo que queda es una señal débil, correspondiente a la parte de la luz comprimida que ha coincidido con el pico de la onda del oscilador local. Modificando la fase relativa de la onda comprimida y de la onda del oscilador local (lo que se obtiene provocando que el haz del oscilador local siga un camino ligeramente más largo al dirigirse al espejo semiplateado), el experimentador puede examinar distintas partes de la onda comprimida y, por tanto, construir una imagen de toda la onda de luz comprimida.

Nos hemos ocupado, hasta ahora, de la compresión de las fluctuaciones del vacío. Apenas si hemos aludido a la compresión de las fluctuaciones de los haces luminosos: los haces láser, por ejemplo. Las técnicas utilizadas son parecidas a las empleadas para comprimir las fluctuaciones del vacío. Sin embar-



5. UN INTERFEROMETRO diseñado para detectar ondas gravitatorias podría hacerse más preciso con la ayuda de luz comprimida. En los diseños actuales (*a*), un haz láser (*izquierda*) se desdobla mediante un espejo semiplateado (*centro*), rebota sobre reflectores masivos (*arriba y a la derecha*) y se recombina en el espejo, donde los haces separados interfieren entre sí. Parte del haz combinado incide sobre un detector. Cuando uno de los reflectores se mueve bajo la influencia de una onda gravitatoria, la figura de interferencia de los haces recombinados cambia, con lo que se altera la cantidad de luz que penetra en el detector. La precisión del interferómetro está limitada por el ruido que entra en el sistema por el espejo que separa el haz y oscurece el haz que alcanza el detector. Una posible solución (*b*) que se ha propuesto consiste en lanzar un haz con las fluctuaciones del vacío comprimidas contra el espejo. Entonces, el ruido del haz emergente disminuiría periódicamente; un detector especial mide exclusivamente las partes menos ruidosas del haz.

go, el resultado difiere bastante, debido a la naturaleza de la incertidumbre que da cuenta de las fluctuaciones.

Las fluctuaciones inherentes a la luz láser abarcan dos clases de incertidumbre. Por un lado, incertidumbre en la amplitud: la amplitud de una onda de luz coherente fluctúa al azar dentro de un margen de incertidumbre. Pero representan también una clase de incertidumbre más sutil: la fase de la onda varía dentro de un margen de incertidumbre. Dicho de otra manera, no se puede predecir con absoluta exactitud ni cuál será la máxima intensidad del campo electromagnético, ni cuándo la intensidad del campo pasará por su valor cero. (Se puede describir la fase de una onda especificando cuándo pasa por el "inicio" de su ciclo, el cero.)

Al comprimir la luz láser, podemos recortar alguna de estas incertidumbres, pero sólo a costa de aumentar la otra. Igual que en la compresión de las fluctuaciones del vacío, siempre que el margen de incertidumbre se estrecha en una parte de la onda, debe ensancharse en otras.

Podemos, por ejemplo, comprimir el margen y hacerlo muy estrecho cerca del pico de la onda. Conoceríamos, entonces, la amplitud de la onda con gran exactitud. Sin embargo, para lograrlo, habría que ampliar el margen en la región donde la onda pasa por el valor cero, incrementando, por tanto, la incertidumbre en la fase de la onda. A la inversa, podría comprimirse el margen de incertidumbre cerca de donde la onda pasa por cero, disminuyendo así la incertidumbre de la fase, pero sólo a expensas de ensanchar el margen cerca del pico de la onda, incrementando consecuentemente la incertidumbre relativa a su amplitud. Ambas clases de luz láser comprimida pueden ser útiles, dependerá de que se quiera medir un efecto que esté condicionado por la fase o lo esté por la amplitud.

La mayoría de las aplicaciones de la luz comprimida que se han desarrollado hasta ahora se basan en la compresión de las fluctuaciones del vacío. Cierto ejemplo exige la puesta a punto de interferómetros que se están desarrollando para medir las ondas gravitatorias supuestamente provocadas por sucesos catastróficos, tales como el colapso gravitatorio de una estrella que desencadena la explosión de una supernova [véase "Observatorios de ondas gravitatorias", por Andrew D. Jeffries, Peter R. Saulson, Robert E. Spero y Michael E. Zucker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1987]. En ese prototipo de interferómetro, la luz procedente de un láser se desdobla en dos haces. Cada haz se envía por un brazo distinto de un interferómetro y se refleja, hacia el centro del dispositivo, en un espejo macizo. Los haces se recombinan y los cambios registrados en sus figuras de interferencia se utilizan para calibrar los cambios ocurridos en las posiciones de los espejos masivos.

Según un análisis de Carlton M. Caves, del Instituto de Tecnología de California, la precisión con la que operan tales dispositivos ha alcanzado ya los límites establecidos por la presencia de las fluctuaciones del vacío en el dispositivo. Utilizando en el dispositivo un haz con las fluctuaciones del vacío comprimidas, y limitando por tanto las fluctuaciones de vacío durante una parte de cada ciclo de la onda, debe ser posible, en principio, lograr un aumento de la precisión en un factor del orden de un millón. Razones de orden práctico, citemos las imperfecciones de los componentes ópticos, limitan el aumento real de precisión, si bien con los equipos actuales puede lograrse mejorar la exactitud de los interferómetros hasta en un factor diez. Se está construyendo varios interferómetros de luz comprimida para comprobar esa mayor precisión.

Los giroscopios ópticos anulares proporcionan otro campo de aplicación. Tales dispositivos detectan y cuantifican movimientos rotatorios mediante el registro de los cambios ocurridos en las figuras de interferencia de haces láser enviados en direcciones opuestas alrededor de un anillo de fibra óptica [véase "Giroscopios ópticos", por Dana Z. Anderson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1986]. Un experimento interesante que exige la intervención de giroscopios ópticos anulares sería el de la medición de la distorsión del espacio debida, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, a la rotación de la Tierra. El efecto debería ser muy pequeño; habría que medir un valor del orden de la milmillonésima de la velocidad de rotación de la Tierra. Sin embargo, el experimento podría ser posible si la precisión de los giroscopios anulares se decuplicara; la luz comprimida podría proporcionar tal aumento de precisión.

Así, pues, en algunos campos, los físicos han logrado ya un grado de precisión tan alto que, si queremos progresar más, habrá que saltarse los límites de precisión que impone el principio de incertidumbre. En éstos, puede utilizarse ya la luz comprimida, en la que la incertidumbre se redistribuye. Cabe esperar que, en los próximos años, la precisión experimental alcanzará también esta situación en múltiples análisis. Podemos incluso aventurar que, en el futuro, las comunicaciones y la computación ópticas se basarán en dispositivos finamente ajustados, por lo que deberán acudir a la luz comprimida para gozar de una mayor fidelidad y precisión. Esta nueva clase de luz inundará de claridad el trabajo de los físicos durante muchos años.

El factor de necrosis tumoral

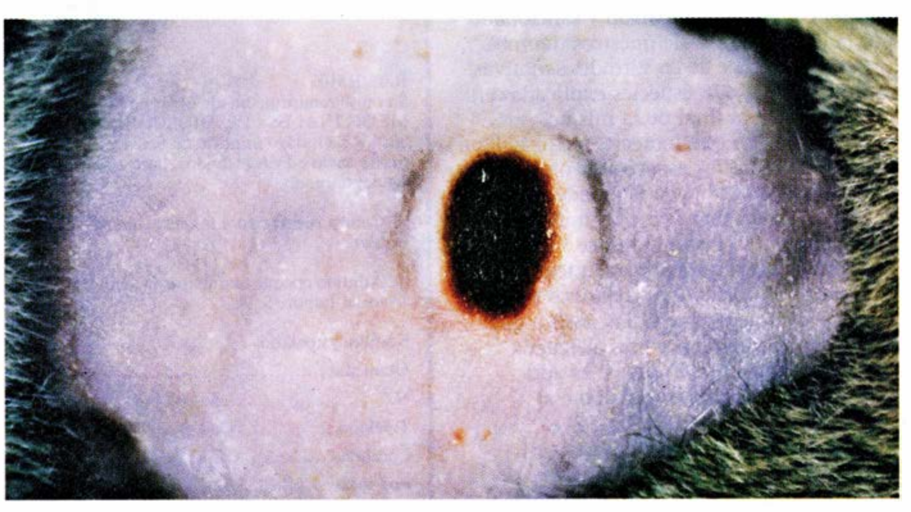
Identificado primero por su actividad anticancerígena, se le considera miembro de una familia de proteínas que orquestan la respuesta del organismo a las lesiones y las infecciones

Lloyd J. Old

Una buena parte del progreso científico es fruto de la interpretación adecuada de sucesos poco comunes. Vale de ejemplo de ello la regresión espontánea del cáncer. Hacia finales del siglo pasado, algunos médicos, muy perspicaces, observaron que en los enfermos de cáncer coincidía a veces una disminución del tamaño del tumor maligno con el desarrollo de infecciones bacterianas. Postularon que ciertos agentes infecciosos, o sus productos, eran capaces de luchar contra el cáncer.

La hipótesis, así como las observaciones posteriores que la corroboraron, estimularon durante mucho tiempo la búsqueda de un mecanismo que relacionara la infección microbiana con la regresión del cáncer. Ciertas pruebas sugerían que, en su ataque mortal contra el tumor, las bacterias no seguían una ruta directa, sino que potenciaban la actividad de las fuerzas del propio organismo destinadas a reprimir el cáncer. Partiendo de esa idea, hace unos 15 años mis colegas y yo descubrimos, en el Centro Oncológico Sloan-Kettering Memorial, un pequeño polipéptido (una proteína) que el cuerpo humano elaboraba en el curso de infecciones bacterianas y que era capaz de destruir tumores cancerígenos en el ratón. Nuestro grupo y otros investigadores nos encontramos ahora en las primeras etapas de la valoración de dicha sustancia, que hemos denominado factor de necrosis tumoral, como base para el tratamiento anticanceroso en los seres humanos.





1. NECROSIS HEMORRAGICA de un tumor canceroso de ratón, que se produce poco después de inyectarle al roedor endotoxina, un componente de las bacterias gram-negativas. Mientras que en un animal sin tratar el cáncer se desarrolla (*arriba*), en el ratón inyectado el tumor se desangra en sí mismo y se destruye (*abajo*). Según parece, el efecto de la endotoxina no es directo, sino que esa sustancia provoca que ciertas células secreten el factor de necrosis tumoral (TNF), que actúa de agente destructor de la proliferación.

Aunque el factor se descubrió por su actividad anticancerosa, en los trabajos realizados para conocer con más detalle sus funciones se ha comprobado que constituye también un importante regulador de la inflamación y la inmunidad, procesos interrelacionados que limitan y reparan las lesiones y luchan contra la infección. Pertenece a la familia de las citoquinas: mediadores polipeptídicos que transmiten las señales de una célula a otra. Junto con otras sustancias, las citoquinas constituyen el lenguaje molecular de la inflamación y la inmunidad y forman un complejo que interactúa y se superpone a la red de señales que regulan las reacciones defensivas del organismo. Tales proteínas, potentes y en ocasiones tóxicas, estimulan o inhiben mutuamente sus efectos.

Igual que el factor de necrosis tumoral, se sabe que otras citoquinas, como el interferón (denominación genérica de varias moléculas de estructura emparentada), poseen actividad anticancerosa y han dado pruebas de

que podrían utilizarse en el tratamiento contra el cáncer. El conocimiento cada vez más profundo de los efectos aislados y combinados de las citoquinas está facilitando el desarrollo de tratamientos de otras afecciones. Por ejemplo, se ha demostrado en ensayos con humanos que el interferón controla ciertas infecciones víricas; también se están sometiendo a valoración clínica otras citoquinas que estimulan la producción de las células sanguíneas que combaten la infección. Parece probable que, para reforzar la capacidad del organismo contra una amplia gama de enfermedades, acaben administrándose las propias citoquinas, o sustancias que induzcan su liberación. Por otro lado, también serían agentes terapéuticos de gran valor los factores inhibidores que se oponen a aquellos mediadores polipeptídicos cuando su actividad resulta tóxica.

La historia del descubrimiento del factor de necrosis tumoral empieza con William B. Coley, cirujano que trabajó en el Hospital Memorial de Nueva York entre 1892 y 1931. A finales del siglo XIX, Coley y otros médicos tuvieron cierto éxito en el tratamiento de pacientes cancerosos por medio de infecciones con bacterias vivas. Sin embargo, la estrategia presentaba múltiples inconvenientes. En algunos enfermos no se podía inducir la infección. Además, careciéndose aún de antibióticos, resultaba problemático el control de las infecciones. Ello animó a Coley a desarrollar vacunas de bacterias muertas: las toxinas de Coley. Reproducían muchos de los síntomas de la infección bacteriana, como la fiebre y los escalofríos, pero se podían administrar sin riesgo de provocar una infección real. En algunos pacientes tratados con las toxinas, los tumores remitían o desaparecían, pero (al igual que en el caso de infecciones producidas por bacterias vivas) los resultados eran aleatorios. En última instancia, la radioterapia y la quimioterapia sustituirían el método de Coley.

El interés por el valor potencial de los microorganismos como agentes de tratamiento del cáncer habría muerto con Coley de no ser porque su hija, Helen Coley Nauts, del Instituto de Investigación del Cáncer, se dedicó a difundir a otros médicos los resultados obtenidos por su padre. También se mantuvo vivo en el laboratorio, y algunos investigadores confirmaron que ciertos agentes infecciosos y sus productos presentaban efectos anticancerosos en animales. En particular, demostraron que la inyección de pequeñas cantidades de bacterias gram-negativas, vivas o muertas, podía provocar la necrosis hemorrágica de tumores de ratones: los tumores se desangraban, se oscurecían y se secaban.

En 1943, en un trabajo de gran importancia para el posterior descubrimiento del factor de necrosis tumoral, Murray J. Shear y sus colegas, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, identificaron y purificaron el componente activo de las bacterias gram-negativas y establecieron que se trataba de un complejo de lípidos y azúcares, lo que hoy denominamos lipopolisacárido (LPS). En trabajos posteriores se demostró que el compuesto formaba parte de la pared externa de las bacterias y que sus efectos podían ser tan beneficiosos cuan perjudiciales. Además de provocar la necrosis hemorrágica de los tumores, el LPS aumentaba la resistencia del animal frente a nuevas infecciones bacterianas y frente a dosis letales de rayos X. En cantidades minúsculas la sustancia causaba también fiebre que, en formas moderadas, ayudaba a combatir la infección; a grandes dosis, el lipopolisacárido llegaba a desencadenar un choque y provocar la muerte. Por sus propiedades tóxicas, la sustancia se encuadra entre las endotoxinas.

A finales de la década de 1950, Baruj Benacerraf, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, y el autor estudiaban un agente bacteriano que posteriormente habría de influir en el descubrimiento del factor de necrosis tumoral: el bacilo de Calmette-Guerin, o BCG. El microorganismo, una forma atenuada del agente causante de la tuberculosis, provoca, en los ratones, una infección autolimitada, que aumenta su resistencia a las invasiones bacterianas ulteriores y al crecimiento tumoral.

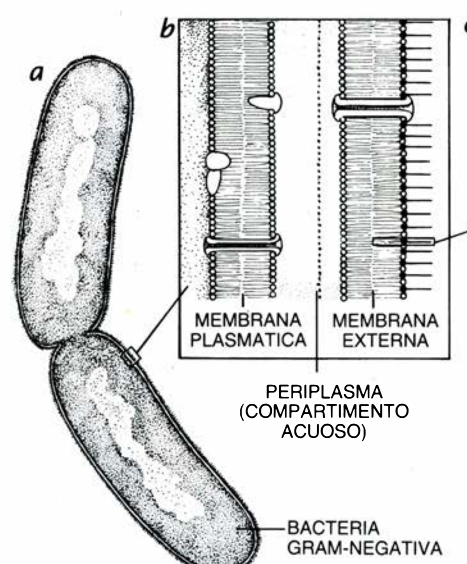
Esos y otros estudios con animales demostraron que algunos productos bacterianos podían destruir los tumores, si bien los datos disponibles no aclaraban el mecanismo responsable. Ciertos ensayos de laboratorio dieron la pista: ni el LPS ni el BCG inhibían o destruían directamente las células tumorales. Sin duda, la acción microbiana era indirecta y estaba mediada por algún factor del huésped. Esa era la situación cuando Elizabeth A. Carswell, Robert L. Kassel, Barbara D. Williamson y el autor descubrieron el factor de necrosis tumoral.

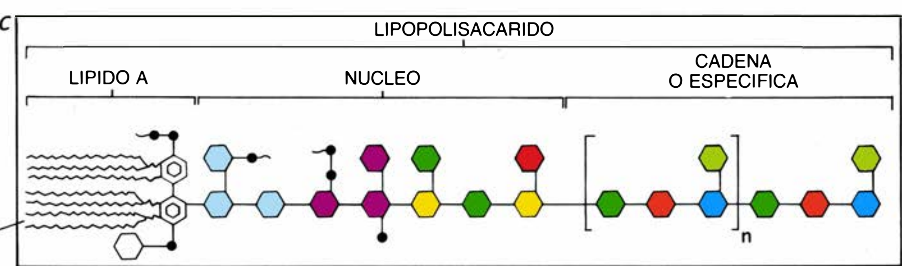


2. WILLIAM B. COLEY, gran impulsor de las investigaciones que condujeron al descubrimiento del TNF. A finales del siglo pasado empezó a tratar a pacientes cancerosos con una vacuna de bacterias muertas y observó que, en algunos casos, los tumores remitían. Trabajos posteriores demostraron que, *in vitro*, la vacuna no destruía las células, lo que provocó la búsqueda de los agentes del organismo a los que estimulaban los productos bacterianos. Esas investigaciones culminaron en la década de 1970 con la identificación del factor de necrosis tumoral.

Durante la búsqueda de sustancias producidas por el organismo que restringieran el crecimiento del cáncer sin lesionar las células normales, observamos que, en ocasiones, la sangre procedente de ratones normales inhibía el crecimiento de células leucémicas de otros ratones sin ejercer efecto aparente alguno sobre los tejidos sanos. Aumentamos los niveles del supuesto factor inhibidor del cáncer. Dado que el LPS y el BCG consolidaban la resistencia de los ratones al crecimiento tumoral, los inyectamos en ratones sanos, extrajimos sangre de éstos y examinamos el efecto de esa sangre sobre los tumores de otros ratones.

En una serie de las pruebas, unos días después de la inyección de BCG inoculamos LPS; la sangre de esos ratones provocó la necrosis hemorrágica de los tumores de otros animales y resultó, *in vitro*, altamente tóxica para las células cancerosas. Tras descartar la posibilidad de que el BCG y el LPS sanguíneos residuales (esta última de difícil exclusión) fueran responsables del daño ejercido sobre los tumores de los ratones tratados, nuestros hallazgos sólo podían tener una explicación: los animales a los que se había inyectado BCG y LPS habían elaborado grandes cantidades de un factor antitumoral y ese factor era el causante de la destrucción del cáncer. Ante los efectos que dicha sustancia producía sobre los tumores, la denominamos factor de necrosis tu-





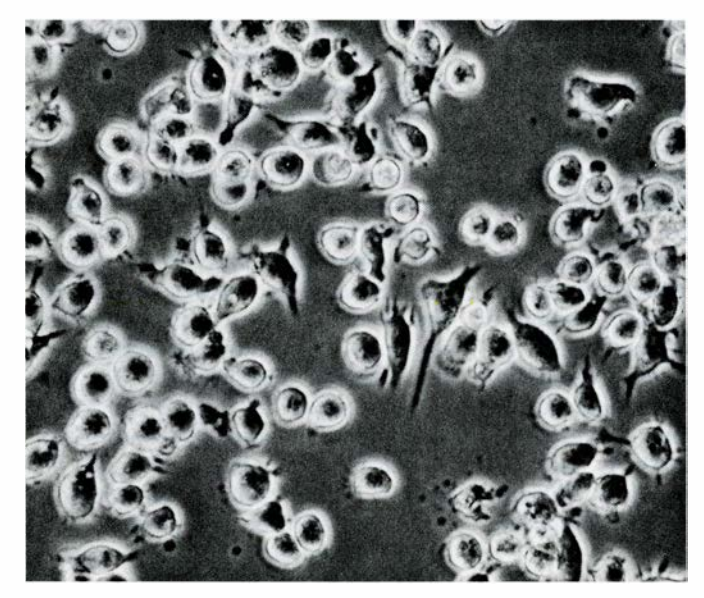
3. ENDOTOXINA, el estimulador más potente de la producción de TNF conocido, que reside en la pared celular (*a*) de las bacterias gram-negativas y sobresale de la membrana externa de las mismas (*b*). También denominado lipopolisacárido, o LPS (*c*), se compone principalmente de lípidos (*líneas quebradas largas*) y azúcares (*hexágonos*). También contiene fosfatos (*puntos*) y otros compuestos fosforados (*puntos con cola*). La longitud y el número de cadenas lipídicas y los azúcares específicos de la molécula de LPS varían entre unas especies bacterianas y otras. El núcleo de la endotoxina contiene varios azúcares (*distinguidos por el color*); la cadena O-específica, un importante antígeno de reconocimiento por parte del organismo, consta de un grupo de azúcares (*corchetes*) repetidos varias veces (*n*). El lípido A es el responsable de los efectos antitumorales (y de otras muchas propiedades) del LPS. La ilustración de la molécula de LPS se basa en el trabajo de Otto Westphal y sus colaboradores, del Instituto de Inmunobiología de Freiburg, Alemania.

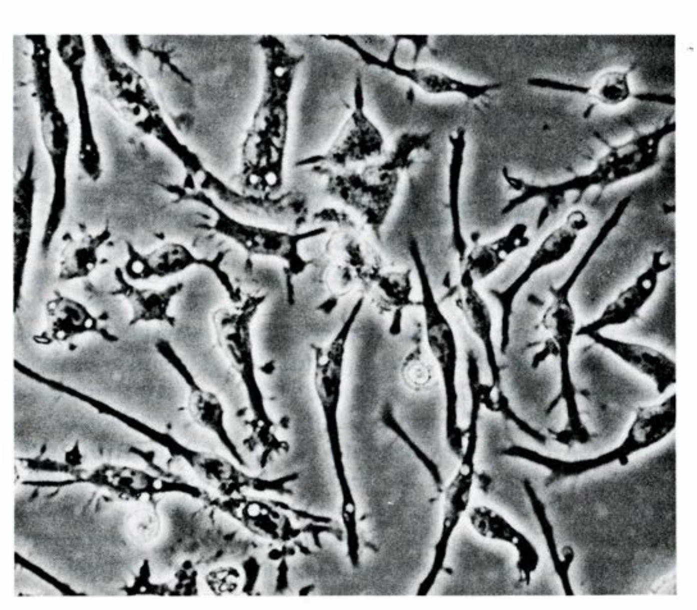
moral. Posteriormente se ha demostrado que el factor reproduce muchos de los efectos del BCG y el LPS, además de servir de intermediario de los mismos.

¿Cuál era la fuente productora de factor de necrosis tumoral? Por distintas razones, habíamos dado por supuesto que se sintetizaba principlamente en macrófagos activos: células que fagocitan y degradan bacterias, células muertas y otros residuos del organismo. En particular, sabíamos que el BCG y el LPS activaban los macrófagos y provocaban el aumento de su presencia en el cuerpo; sabíamos también que si se unían macrófagos activados por BCG o LPS con células tumorales, éstas se destruían.

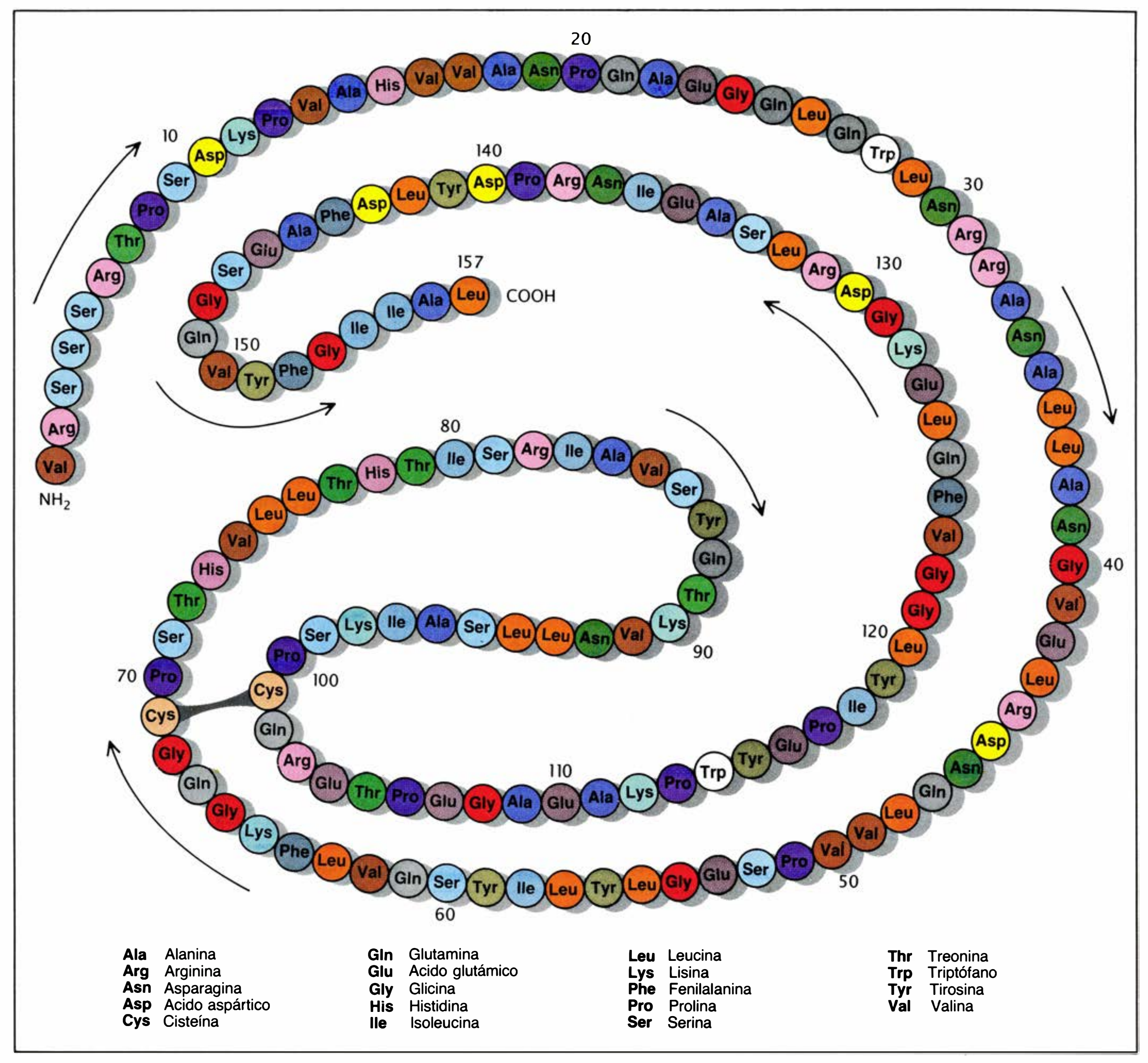
Descubierto ya el factor de necrosis tumoral en los ratones, poco después demostramos que también lo producían los conejos, las ratas y los cobayos. El paso siguiente consistía en aislarlo del suero sanguíneo y definir sus características químicas, para así obtener una cantidad suficiente del mismo y estudiarlo en detalle. El proceso de purificación era arduo; aunque el factor podía detectarse en la sangre procedente de animales tratados con BCG y LPS, solía encontrarse en cantidades mínimas. Además, en cada fase del proceso de purificación debía corroborarse la presencia del factor, comprobación que se llevaba a cabo valorando la capacidad de realizar ciertas actividades por parte de cada extracto aislado. Por ejemplo, tenían que inducir necrosis hemorrágica en tumores animales y destruir *in vitro* ciertos tipos de células cancerosas; esos efectos debían ejercerse con cantidades progresivamente menores en las fases sucesivas de la purificación.

Saul Green, colega nuestro del Instituto Sloan-Kettering, inició el proceso de purificación y aisló una cantidad suficiente del factor del ratón; ello nos permitió demostrar que el efecto sobre tumores animales y la acción *in vitro* sobre células malignas los causaba una misma sustancia, y no dos asociadas, una activa en el organismo y otra *in vitro*. Dicha sustancia era, según demostramos, una proteína. Katsuyuki Haranaka, primero trabajando con nuestro grupo y más tarde con Nobuko Satomi, de la Universidad de Tokyo, prosiguió la investigación hasta lograr





4. MACROFAGOS (*izquierda*) que se extienden y alargan (*derecha*) cuando se exponen al LPS, lo que constituye una señal de que se han activado. Desempeñan un papel fundamental en los procesos inflamatorios e inmunitarios y pueden destruir a las células cancerosas y secretan docenas de factores, entre ellos el de necrosis tumoral, a los que corresponde el desarrollo de muchas de sus acciones. Por ejemplo, Hans Schreiber y sus colaboradores, de la Universidad de Chicago y Genentech, han demostrado que el factor de necrosis tumoral es un mediador de la destrucción de células cancerosas por parte de los macrófagos activados.



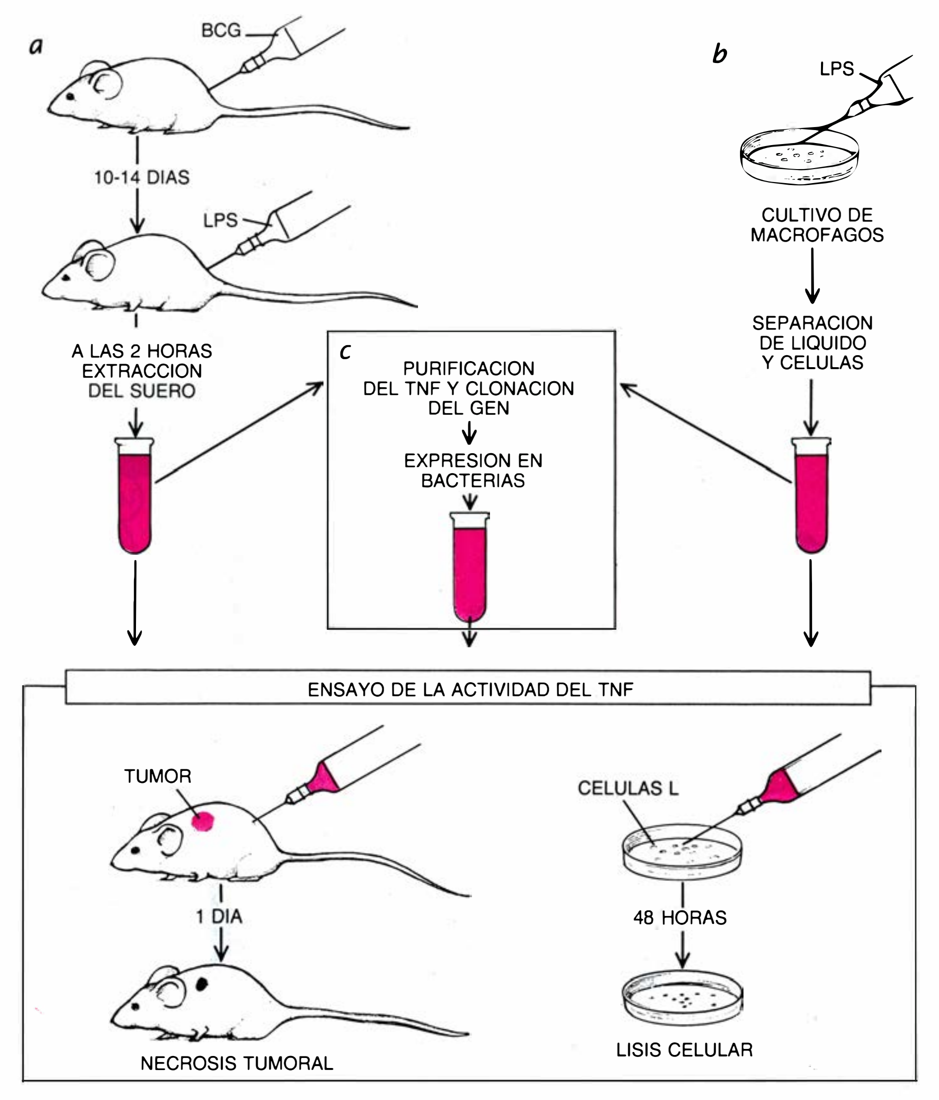
5. MOLECULA del factor de necrosis tumoral humano, una proteína compuesta por 157 aminoácidos, cuya secuencia se determinó en 1984, cuando, tras una década de esfuerzos para purificar el polipéptido, varios grupos relacionados con compañías de biotecnología clonaron el gen codificador del TNF.

separar un polipéptido —factor de necrosis tumoral puro— de la sangre de ratones y conejos.

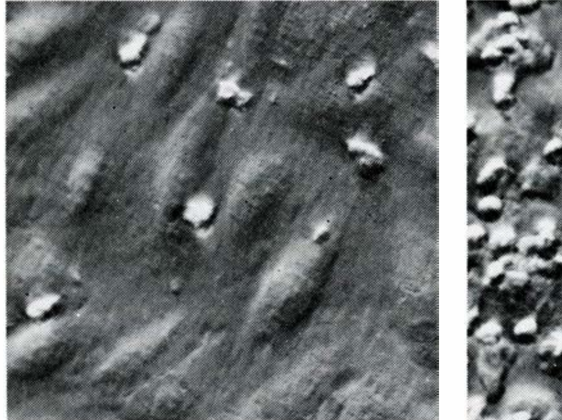
Contemporáneamente, Danielle N. Männel y Stephan E. Mergenhagen, del Instituto de Investigaciones Odontologicas, y N. Matthews, de la Universidad de Gales, demostraron que, como se había sospechado, los macrófagos producían el factor de necrosis tumoral. En la búsqueda de un tipo de células humanas adecuado para la producción en cultivo de grandes cantidades del factor, Williamson, Carswell y el autor, junto con Berish Y. Rubin, del Centro Hematológico de Nueva York, analizaron gran número y descubrieron que, además de los macrófagos, otras células secretaban un factor dotado de las propiedades del factor de necrosis tumoral.

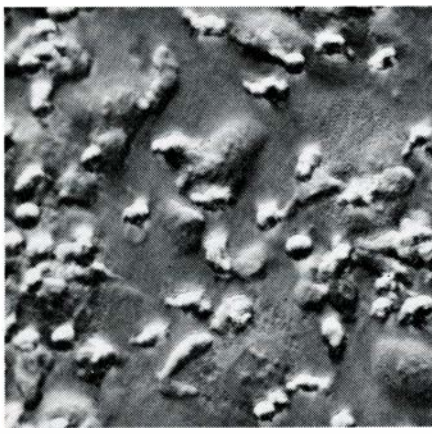
Nuestro trabajo con los factores del ratón y humano nos permitió descubrir muy pronto dos características del factor de necrosis tumoral que podrían resultar de especial importancia para el tratamiento. Comprobamos que el factor de necrosis tumoral y el interferón —del que también se conocían efectos antitumorales— actuaban sinérgicamente. Al exponer células cancerosas a ambos factores a la vez, se producía una destrucción celular mucho mayor de lo que sería de esperar sumando los efectos individuales de las dos sustancias. También descubrimos que el factor de necrosis tumoral humano, igual que la variedad del ratón, no presenta especifidad de especie: lo mismo destruía las células cancerosas del ratón que las humanas. El interferón, por el contrario, sí era propio de cada especie.

La tarea de purificar el factor de necrosis tumoral culminó por fin en 1984, tras una década de esfuerzos, con la clonación del gen, la identificación de la secuencia de aminoácidos de la proteína y la producción de grandes cantidades de factor por parte de varios grupos de investigadores adscritos a compañías de biotecnología; citaré, entre éstos, a David V. Goeddel y sus colaboradores de Genentech, Inc., y Walter Fiers y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Gante y de Biogen S. A. Desde entonces, se ha mul-



6. SE OBTIENE MATERIAL QUE CONTIENE TNF de la sangre de los ratones a los que se ha inyectado previamente el bacilo bacteriano de Calmette-Guérin (BCG) y LPS (*a*) o del líquido resultante del cultivo de macrófagos junto con LPS (*b*). La purificación de esos materiales permite clonar el gen del TNF e insertarlo en una bacteria, para que produzca grandes cantidades del factor (*c*). Para comprobar que el TNF sigue presente en una preparación (*abajo*) debe demostrarse que el material recogido provoca la necrosis hemorrágica de tumores animales y que destruye células L (un linaje de células malignas) en cultivo.





7. DEMOSTRACION *IN VITRO* de una acción del factor de necrosis tumoral. En circunstancias normales, las células endoteliales (*protuberancias alargadas*) que revisten la cara interna de los vasos sanguíneos no interactúan con los leucocitos polimorfonucleares (*cuerpos brillantes*) —un tipo de glóbulos blancos de la sangre que digieren las bacterias—, cuando ambos tipos celulares entran en contacto (*izquierda*). La exposición de las células endoteliales al factor de necrosis tumoral o a la isoleucina-1, otro producto de los macrófagos, les induce a sintetizar moléculas que favorecen la adherencia de los leucocitos (*derecha*). Presumiblemente, en el organismo tiene lugar un fenómeno similar: en respuesta a una lesión, el TNF y otros factores estimulan la adhesión de los leucocitos a la pared vascular, facilitando su migración al tejido lesionado. Michael A. Gimbrone, Jr., de la Facultad de Medicina de Harvard, cedió las microfotografías.

tiplicado la información sobre el factor y sus propiedades.

Hoy no cabe duda de que el factor de necrosis tumoral insta múltiples reacciones en el organismo, ni de que el conocimiento de todas sus funciones precisará algún tiempo. En cualquier caso, la investigación ha demostrado que ese factor resulta decisivo en los procesos inflamatorios e inmunitarios, que se secreta en los comienzos de esos procesos y que estimula la producción de otros muchos polipéptidos por parte de las células defensivas.

Para comprender el papel desempeñado por el factor de necrosis tumoral en la inflamación y en la inmunidad es necesario conocer la serie de sucesos que se desencadenan a raíz de una agresión, sea un trauma mecánico, una lesión de carácter químico o una infección. Lo que sigue es una simplificación que necesariamente omite multitud de participantes y de hechos. En teoría, la inflamación puede considerarse aquel aspecto de la función defensiva que confina y repara la lesión; y la inmunidad, la responsable de neutralizar específicamente a los microorganismos invasores y de conferir protección frente a una infección futura por el mismo agente. Ambos procesos son inseparables en realidad: la mayoría de las células y moléculas que defienden al organismo intervienen lo mismo en el proceso inflamatorio que en la inmunidad.

En la primera fase de la respuesta a la lesión, los leucocitos polimorfonucleares, o granulocitos, abandonan el torrente sanguíneo y se unen a las células endoteliales que tapizan los vasos sanguíneos. Las células endoteliales se separan y permiten el paso de los granulocitos hacia el interior del tejido lesionado, donde éstos ingieren y destruyen cualquier microorganismo que pudiera haber infectado la herida. Cuando se acumulan y mueren grandes cantidades de glóbuos blancos en la zona de la inflamación se forma pus.

Al poco tiempo, los macrófagos se unen a la batalla y pasan a convertirse en el tipo celular predominante en el lugar de la lesión. Los macrófagos tragan y destruyen las bacterias, especialmente las revestidas con anticuerpos, y las células lesionadas. Simultáneamente, se aviva la actividad de otras células de la sangre: los linfocitos *T* (células blancas que maduran en el timo) proliferan y estimulan la división de otras células defensivas, entre ellos los linfocitos *B*, que se dividen, especializan y producen anticuerpos en abundancia.

Conforme va controlándose la infección, los fibroblastos del tejido conjuntivo y otras células empiezan a reparar el tejido lesionado.

El factor de necrosis tumoral comienza a ejercer sus múltiples efectos coincidiendo con la ofensiva de los macrófagos, que también liberan ciertas citoquinas (interleucina-1) y factores de estimulación colonial. La interleucina-1 difiere del factor de necrosis tumoral en su estructura, pero comparte muchas funciones con él. Los factores de estimulación colonial inducen, en la médula ósea, la producción de células sanguíneas, como leucocitos polimorfonucleares y monocitos (precursores de los macrófagos).

Michael P. Bevilacqua, Jordan S. Pober y Michael A. Gimbrone, Jr., de la Facultad de Medicina de Harvard, descubrieron que el factor de necrosis tumoral y la interleucina-1 instaban, ambos, cierta actividad de las células endoteliales: sintetizar moléculas que incrementaban la adhesión de los granulocitos a la superficie de los vasos sanguíneos. El factor de necrosis tumoral ejercía también un efecto directo sobre los granulocitos, intensificando su grado de unión a la pared vascular y su emigración hacia el tejido lesionado. Por otra parte, Michael A. Palladino, Jr., de la compañía Genentech, y Carl F. Nathan, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cornell, han demostrado que el factor constituye una de las señales más potentes para estimular, por parte de los granulocitos, la síntesis de productos oxigenados bactericidas.

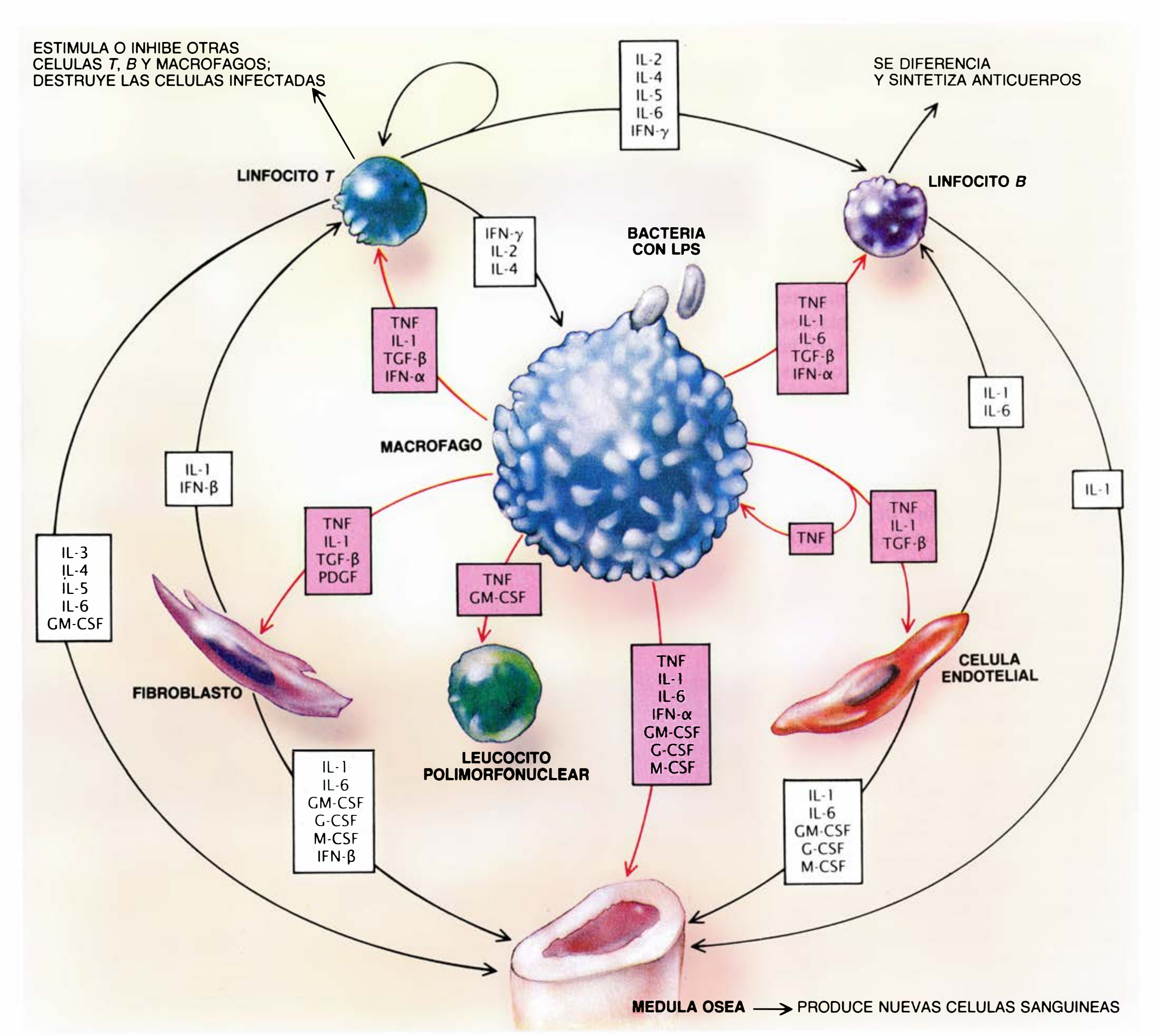
En la activación de los linfocitos *T*, además de la interleucina-1 interviene el factor de necrosis tumoral. A su vez, esas células producen interleucina-2 (un factor de crecimiento de las células *T* y *B*), interferón gamma (que activa también a los macrófagos), varios otros factores que disparan la multiplicación de las células *B* y factores de estimulación colonial [*véase la figura 9*]. Las células *T* activadas producen linfotoxina, una citoquina de estructura y función bastante similares al factor de necrosis tumoral. Gale A. Granger y T. W. Williams, de la Universidad de California en Irvine, así como Nancy H. Ruddle y Byron H. Waksman, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, descubrieron este último aspecto.

Igual que sobre los linfocitos *T*, el factor de necrosis tumoral y la interleucina-1 influyen sobre los linfocitos *B*: regulan la producción de anticuerpos por parte de esas células; promueven también la secreción de más factores de estimulación colonial por parte de diversos tipos celulares, incluidos los fibroblastos y las células endoteliales.

El factor de necrosis tumoral y otras citoquinas son responsables de ciertos efectos sistémicos que acompañan a las respuestas inflamatoria e inmunitaria. Por citar un ejemplo, el factor de necrosis tumoral y la interleucina-1 actúan sobre los centros cerebrales de la temperatura para que suba la fiebre. También, el aumento de la concentración sanguínea de las llamadas proteínas de fase aguda es resultado indirecto

FAMILIA	MIEMBROS	OTROS NOMBRES
Interferones (IFN)	IFN-α	Interferón de leucocitos
	IFN-β	Interferón de fibroblastos
	IFN-γ	Interferón inmune
Factores de necrosis tumoral (TNF)	TNF	TNF-α, caquectina
	Linfotoxina	TNF-β
Interleucinas (IL)	IL-1 α, IL-1 β	Pirógeno endógeno, Factor activador de los linfocitos, Mediador endógeno de los linfocitos, Hemopoyetina 1
	IL-2	Factor de crecimiento de las células *T*
	IL-3	CSF pluripotencial, Factor de crecimiento de los mastocitos
	IL-4	Factor 1 de estimulación de las células *B* (BSF-1)
	IL-5	Factor de restitución de las células *T* (TRF), Factor de diferenciación de los eosinófilos, Factor-II de crecimiento de las células *B* (BCGF-II)
	IL-6	Factor 2 estimulador de las células *B* (BSF-2), Interferón-β_2, Factor estimulador de los hepatocitos
Factores estimuladores de las colonias (CSF)	CSF de granulocitos y macrófagos (GM-CSF)	CSF-2
	CSF de granulocitos (G-CSF)	Pluripoyetina
	CSF de macrófagos (M-CSF)	CSF-1
	Eritropoyetina	
Otros factores de crecimiento y reguladores (GF)	Factor de crecimiento epidérmico (EGF)	
	Factor de crecimiento de los fibroblastos (FGF ácidos y básicos)	
	Factor-1 de crecimiento del tipo de la insulina (IGF-1)	Somatomedina C
	Factor-2 de crecimiento del tipo de la insulina (IGF-2)	Somatomedina A
	Factor de crecimiento nervioso (NGF)	
	Factor de crecimiento derivado de las plaquetas (PDGF)	
	Factor de crecimiento transformante-α (TGF-α)	
	Factor de crecimiento transformante-β (TGF-β)	

8. FACTORES PROTEICOS implicados en los procesos inflamatorios, inmunitarios y del crecimiento y la inhibición celular, que suelen agruparse en familias. Existe, pese a esa clasificación, un considerable solapamiento en sus acciones: moléculas sin parentesco estructural, como el factor de necrosis tumoral y la interleucina-1, presentan muchos efectos idénticos. Para mayor complejidad, ciertos factores pueden potenciar o contrarrestar mutuamente sus efectos. La linfotoxina, de la familia del TNF, la producen los linfocitos *T*, glóbulos blancos fundamentales para la destrucción de las células infectadas. Se agrupa con los factores de necrosis tumoral porque guarda relación estructural y funcional con el TNF elaborado por los macrófagos.



9. FACTOR DE NECROSIS TUMORAL (*flechas de color*) que, tras ser secretado por un macrófago estimulado por el lipopolisacárido que forma parte de la membrana de una bacteria (*centro*), activa una serie de mecanismos inmunitarios. Junto con la interleucina-1 (IL-1) y muchos otros productos del macrófago, el TNF actúa sobre varias células: leucocitos polimorfonucleares (PMN), linfocitos *T*, linfocitos *B* productores de anticuerpos, células endoteliales, fibroblastos (células del tejido conjuntivo) y células hematopoyéticas de la médula ósea. Todas ellas desempeñan funciones específicas en la lucha contra la infección y en la limitación y la reparación de lesiones, y en parte desarrollan su acción secretando factores, incluidas las interleucinas, interferones (IFN-α, -β y -γ), factores de crecimiento (GF) y factores estimuladores de las colonias (CSF). En el esquema, pese a su complejidad, se han omitido gran número de procesos.

de la liberación del factor de necrosis tumoral. Según se cree, las proteínas de fase aguda, que se sintetizan en el hígado, aumentan la eficacia de las reacciones inflamatorias y parecen estar reguladas por la interleucina-6, un factor descrito recientemente que elaboran diversos tipos celulares en respuesta al factor de necrosis tumoral, a la interleucina-1 o al interferón.

Se supone que los procesos de la inflamación y la inmunidad, al igual que otras reacciones normales del organismo, mantienen o restauran la salud. Pero pueden también provocar algunos síntomas molestos. Aulus Cornelius Celsus, médico de la Roma clásica, identificó ya los síntomas característicos: *rubor*, *tumor* (hinchazón), *calor* y *dolor*. No obstante, estos síntomas pueden variar ampliamente e incluir otros, como el sofoco o la congestión nasal que acompañan a los resfriados o a una alergia. A menudo, los responsables de esos síntomas no son los gérmenes invasores, sino la respuesta del organismo a la infección. Si la respuesta defensiva es demasiado enérgica o se prolonga en exceso —como sucede cuando la infección se torna crónica— puede causar un daño permanente. Tal es el caso de la artritis reumatoide, en la que la inflamación crónica ejerce efectos debilitantes sobre el individuo. Una respuesta inflamatoria potente también puede causar un choque e incluso la muerte. En trabajos recientes se ha demostrado que el factor de necrosis tumoral es el responsable de muchos de los efectos negativos asociados con la respuesta defensiva.

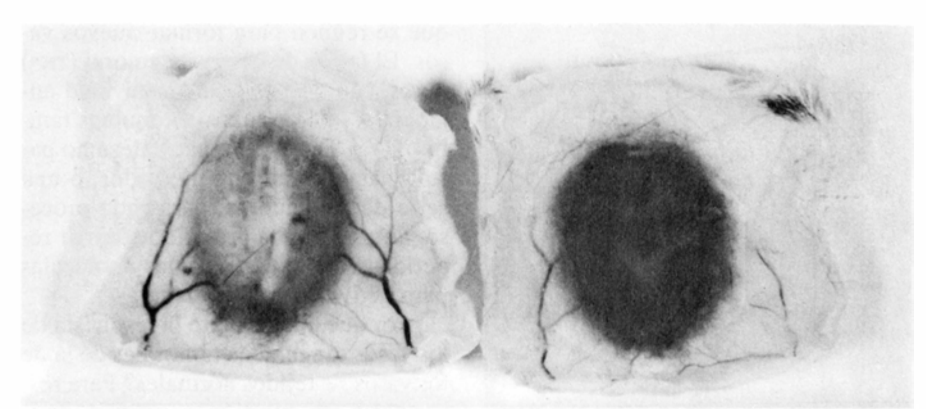
En este sentido, diversos estudios sugieren que el factor de necrosis tumoral podría contribuir a la aparición de caquexia: estado caracterizado por una pérdida de peso importante a expensas de la desaparición de los depósitos de grasa y de la disminución de la masa muscular. En ocasiones, ese trastorno aparece cuando el organismo se mues-

tra incapaz de superar una infección; se observa también en pacientes cancerosos.

Hace algunos años, Bruce Beutler y Anthony Cerami, de la Universidad Rockefeller, descubrieron que un factor producido por los macrófagos activados inhibía la enzima lipoproteínlipasa, necesaria para el normal almacenamiento de la grasa y que aparece inhibida en los sujetos caquécticos. Cuando se purificó el factor, al que denominaron caquectina, y se determinó su secuencia de aminoácidos, se advirtió que era idéntico al de necrosis tumoral. En trabajos posteriores se demostró que la interleucina-1 y el interferón inhiben también *in vitro* la actividad de la lipoproteínlipasa. En todo caso, el papel que desempeñan esas citoquinas y otros factores en la aparición de la caquexia en pacientes con infecciones crónicas o en enfermos tumorales se encuentra aún a la espera de una definición más rigurosa.

Las investigaciones de la capacidad de mediación del factor de necrosis tumoral en los efectos del LPS brindaron nuevos indicios sobre el desconcertante poder del factor de causar lo mismo efectos perjudiciales que beneficiosos. Se ha demostrado que la inyección de una cantidad suficiente de factor de necrosis tumoral en ratones y otros animales produce lesiones hísticas, choque y muerte, exactamente igual que sucede con el LPS. Sin embargo, a dosis inferiores, el factor presenta idénticos efectos positivos que se asocian al LPS: protege a los ratones ante infecciones bacterianas, dosis letales de rayos X y crecimiento tumoral.

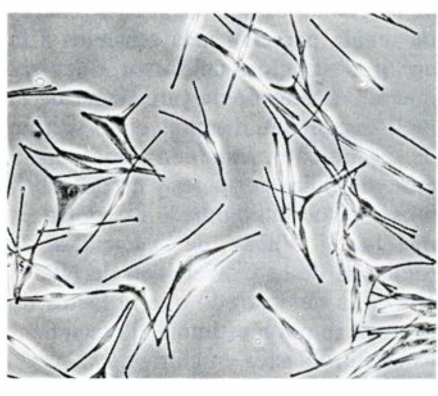
En este sentido, han resultado reveladores ciertos estudios de enfermedades parasitarias en animales. Por una parte, los ratones a los que se ha inoculado factor de necrosis tumoral son más resistentes a ciertas formas de malaria. Asimismo, se ha demostrado que el factor estimula a los macrófagos y a otras células de la sangre a que destruyan los parásitos responsables de la enfermedad de Chagas y de la esquistosomiasis. Por otra parte, Pierre Vassalli y sus colaboradores, de la Universidad de Ginebra, han demostrado recientemente que el factor interviene en la muerte de ratones afectos de paludismo que les ha afectado el cerebro: según parece media en la inflamación letal que se produce en el tejido cerebral. El ratón no muere si se le administra un anticuerpo que neutralice el efecto lesivo del factor de necrosis tumoral sobre el cerebro.



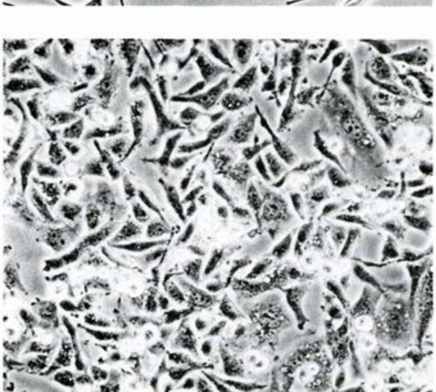
10. DIMINUTOS CAPILARES suelen alimentar a los tumores (*izquierda*), pero los vasos del interior del tumor se destruyen (*derecha*) y sangran pocas horas después de inyectar en el ratón cierta cantidad de factor de necrosis tumoral. Puesto que esa lesión vascular selectiva priva al tumor de oxígeno y nutrientes, pronto mueren la mayoría de las células del mismo. Múltiples pruebas sugieren que la destrucción vascular es el principal mecanismo de que se vale el TNF para producir la necrosis hemorrágica en los tumores. Las fotografías son de Edward A. Havell y Robert J. North del Instituto Trudeau, en Saranac Lake, Nueva York.

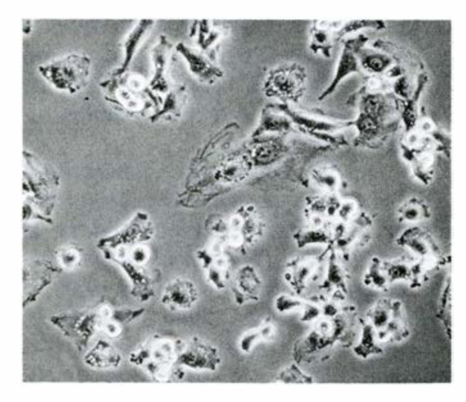
Otro indicio que confirma la potencial toxicidad del factor de necrosis tumoral se ha revelado en el hombre. A. Waage, de la Universidad noruega de Trondheim, ha descubierto que los pacientes de infecciones meningocócicas graves que presentan niveles altos del factor en sangre tienen más probabilidades de morir a consecuencia de un choque que aquellos otros que no presentan niveles detectables del polipéptido.

En el caso del factor de necrosis tumoral, como en el de muchos otros factores producidos en el organismo, parece existir un estrecho margen entre el beneficio y el daño: un agente fundamental para el control local de la lesión y de la infección puede resultar tóxico si se libera en grandes cantidades o en un lugar indebido. El conocimiento progresivo del potencial perjudicial del TNF ha estimulado la búsqueda de sustancias que bloqueen su acción cuando

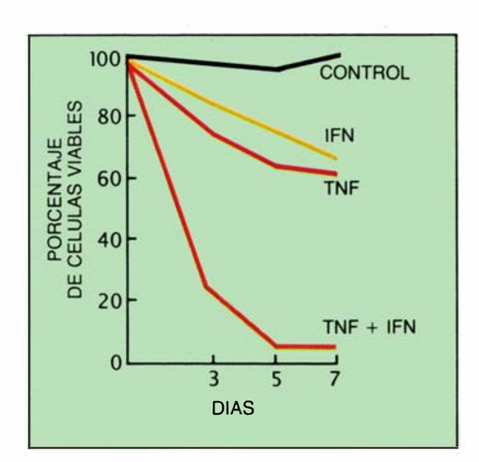








11. MELANOCITOS, células epiteliales que sintetizan el pigmento melanina (*arriba, a la izquierda*); proliferan notablemente cuando se exponen *in vitro* al factor de necrosis tumoral (*arriba derecha*). Por el contrario, las células de melanoma, un cáncer de piel (*abajo, a la izquierda*), detienen su crecimiento tras su exposición al TNF (*abajo, a la derecha*), como han demostrado Yuko Arita y Magdalena Eisinger, del Centro Oncológico Memorial Sloan-Kettering. Tales hallazgos sugieren que, además de afectar a los vasos sanguíneos, el TNF podría causar una toxicidad directa y selectiva sobre células cancerosas del propio organismo.



12. INTERFERON Y TNF ejercen un efecto sinérgico sobre las células del cáncer de mama humano. Cuando se reúnen ambos agentes, destruyen más células malignas (*naranja*) que si se sumaran los efectos aislados del interferón (*amarillo*) y del TNF (*rojo*). Tal sinergismo de la acción indica que los tratamientos del cáncer que combinan ambas sustancias probablemente resulten más efectivos que las terapias basadas en la administración de una sola sustancia.

los efectos negativos superen a los protectores.

Pese a la rápida acumulación de nueva información sobre el factor de necrosis tumoral, seguimos sin conocer el mecanismo responsable de los efectos que le dieron nombre: la hemorragia y la necrosis de los tumores. Podría aducirse la función reguladora del factor en los procesos inflamatorios e inmunitarios. Aun cuando el factor de necrosis tumoral no confiriera una toxicidad directa contra los tumores, podrían sumar sus fuerzas las células *T* y otras por él estimuladas, así como las demás citoquinas que estas células secretan al activarse, y, juntas, destruir el tumor.

Sin embargo, existen pruebas evidentes de que, aparte de esa acción antitumoral generalizada, el factor de necrosis tumoral ejerce un efecto inmediato sobre el cáncer. En estudios con animales se ha demostrado que lesiona los vasos sanguíneos que nutren el tumor. Ese daño reduce el flujo de sangre y oxígeno hacia las células tumorales y las mata.

¿Y en los tejidos no cancerosos? Allí, el factor de necrosis tumoral desempeña un papel fundamental en la angiogénesis (formación de nuevos vasos sanguíneos durante el desarrollo o sustitución de los vasos lesionados). Marijke Fràter-Schröder, de la Universidad de Zurich, y S. Joseph Leibovich, de la Universidad del Noroeste, y sus colaboradores han demostrado que la inoculación del factor de necrosis tumoral en animales induce el crecimiento de las células endoteliales normales, que se reúnen para formar nuevos vasos. El factor de necrosis tumoral (TNF) no es el único dotado de actividad angiogénica; otras cuatro citoquinas también la presentan. La naturaleza no parece haber creado un mediador, o una serie de mediadores, para cada proceso; antes bien, ha preferido recurrir repetidamente a las mismas moléculas para actividades muy distintas.

¿Por qué difiere tanto la respuesta de los vasos sanguíneos tumorales de la de los vasos de tejidos normales? Para responder a esa cuestión es preciso conocer mejor la regulación de la angiogénesis. En opinión de algunos, las propias células tumorales, o las células defensivas atraídas por el cáncer, sintetizan un factor por medio del cual los vasos tumorales se tornan susceptibles de sufrir el daño inducido por el factor de necrosis tumoral.

Además de lesionar los vasos sanguíneos del tumor, el factor de necrosis tumoral destruiría también directamente las células tumorales del organismo; eso ocurre *in vitro*. En un estudio con células procedentes de más de 60 cánceres humanos distintos, mis colaboradores y yo advertimos que el factor causaba tres tipos de respuestas: muerte de la célula, inhibición del crecimiento celular o ningún efecto. En cada categoría se encuadraba un tercio de las células estudiadas. Las de cáncer de mama parecían más sensibles a la acción destructora del factor, mientras que las de melanoma (un cáncer de la piel) respondían disminuyendo su tasa de crecimiento. También sometimos a ensayo células normales y no descubrimos efectos inhibidores. Lo cierto es que Jan T. Vilček, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York, ha demostrado que el factor de necrosis tumoral estimula el crecimiento de fibroblastos en cultivo.

El primer paso de la acción de muchas de las sustancias que influyen sobre la actividad celular es su unión con receptores específicos de la superficie celular; por esa razón, Rubin, Vilček y otros han analizado independientemente si las diversas respuestas de las células cancerosas al factor de necrosis tumoral podrían estar relacionadas con la presencia o ausencia de receptores del polipéptido. Se encontraron receptores específicos para el factor, pero no se detectó ninguna relación entre el número de receptores y la respuesta de las células al factor de necrosis tumoral. Por tanto, la respuesta a la presencia del factor debe estar determinada por otras características.

Lo que dotaría a la célula de particular sensibilidad a la toxicidad del factor de necrosis tumoral sería la disminución de su capacidad de reparar el daño que inflige el factor. George E. Gifford, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Florida, expuso células a agentes que inhibían sus funciones esenciales, como la síntesis del ARN, y comprobó que aumentaba significativamente la sensibilidad de las células a los efectos tóxicos del factor. Incluso se destruían las que de otro modo no solían verse afectadas. Tales resultados implicaban que las células disponían de un mecanismo para reparar las lesiones producidas por el factor de necrosis tumoral y que, al fallar (como podía ser el caso de ciertas células cancerosas), las células expuestas al factor morían. No se sabe qué es lo que en realidad provoca la muerte celular, pero existen pruebas de que las citoquinas activan enzimas intracelulares que liberan moléculas altamente reactivas. Quizá la acción de esas moléculas lesione y acabe destruyendo las células cancerosas.

Un objetivo primordial de la investigación en curso sobre las características del factor de necrosis tumoral es el desarrollo de tratamientos contra el cáncer. Se están realizando en muchos hospitales los primeros ensayos clínicos del factor. En los casos en que el polipéptido se ha administrado de forma que circule por el organismo entero, sólo unos pocos pacientes han mostrado inhibición tumoral a las dosis estudiadas hasta la fecha. En Japón y Alemania se ha inyectado el factor directamente en los tumores. Parte de los pacientes sometidos a ese tratamiento han presentado regresión tumoral, en algunos casos completa. Pero existen efectos colaterales. Al igual que otras citoquinas cuyo aprovechamiento en la lucha contra el cáncer está sometiéndose a análisis, el factor de necrosis tumoral puede provocar fiebre, escalofríos, letargia y descenso de la presión arterial. Muchos pacientes se sienten como si estuvieran pasando la gripe.

Los ensayos clínicos con el factor y otras citoquinas pretenden valorar los efectos de cada sustancia por separado, pero parece probable que el logro de tratamientos anticancerososo más eficaces obligue al uso de combinaciones de varias citoquinas, o de citoquinas con otras sustancias. En ese sentido, apoyándose en que el factor de necrosis tumoral y el interferón actúan sinérgicamente, Janice L. Gabrilove y Herbert F. Oettgen, del Sloan-Kettering, están valorando una terapia en la que

se aplican conjuntamente esos dos agentes.

Uno de los primeros hallazgos logrados es que ciertas dosis de los agentes combinados producen en los enfermos un dolor agudo en la localización del tumor, donde no habían sentido dolor antes del tratamiento. Se ignora su causa, pero un dolor de esas características sugiere que se han dañado los vasos sanguíneos. Estamos ahora explorando la posibilidad de que el tratamiento afecte a los vasos que irrigan el tumor. Asimismo, se están diseñando otros ensayos de terapias combinadas: se administrará factor de necrosis tumoral junto con interleucina-2 (que parece un prometedor agente anticanceroso), agentes quimioterápicos, anticuerpos monoclonales y radiaciones.

Múltiples estudios han confirmado ya que la decisión de William Coley de tratar pacientes cancerosos con microorganismos no carecía de sentido. Cuando sus toxinas resultaban eficaces, casi siempre instaban a los macrófagos del cuerpo humano a sintetizar el factor de necrosis tumoral y otros que, en conjunto, ejercían efectos anticancerosos. ¿Por qué, entonces, la mayoría de los médicos clínicos ha ignorado la estrategia de Coley durante tantos años?

Porque, para comprender el funcionamiento de las toxinas, deben conocerse a fondo los procesos inflamatorios e inmunitarios. Hasta hace pocos años no se habían identificado las principales moléculas que intervienen en esos procesos. Además, las respuestas a las toxinas de Coley variaban mucho entre pacientes, dándose el caso de que muchos enfermos tratados no obtenían ningún tipo de beneficio.

Desde nuestra perspectiva actual, parece probable que los enfermos que no respondieron fueron incapaces de producir el factor de necrosis tumoral o las demás citoquinas que activan la inflamación y la inmunidad y combaten el cáncer. Ahora, cuando se ha identificado ese factor y muchos otros implicados en la evolución de la infección, quizá puedan emplearse como versiones nuevas y más eficaces de las toxinas de Colley.

Nos encontramos sólo en el principio. Si hay suerte, los nuevos tratamientos redoblarán las fuerzas anticancerosas naturales del organismo y lograrán las regresiones tumorales que han nutrido la imaginación de varias generaciones de investigadores del cáncer. Las fuerzas existen; falta el modo de desencadenarlas.

Ciencia y sociedad

Atomos parónicos

El principio de exclusión de Pauli, que recibe el nombre de su autor, el físico austriaco Wolfgang Pauli, constituye una de las piedras angulares de la física moderna. En efecto, sin él, no habría ni física, ni materia quizá. Para los físicos, el principio es impermeable. Sin embargo, dos teóricos de la Universidad de Maryland en College Park han formulado una teoría cuántica de campos relativística que podría abrir una brecha, pequeña aunque detectable, en el principio de exclusión de Pauli.

Se invoca el principio de exclusión para explicar por qué los electrones de un átomo ocupan una sucesión de "órbitas" de niveles de energía progresivamente superiores, en vez de precipitarse en masa al estado fundamental. Pauli demostró que dos partículas de la clase de los fermiones (electrones, protones o neutrones) no podían ocupar la misma órbita si presentaban números cuánticos idénticos. Los electrones poseen el número cuántico denominado espín, que puede ser *arriba* o *abajo*. Así, en cada órbita pueden acomodarse hasta dos electrones si sus espines apuntan en sentidos contrarios.

El año pasado, dos físicos rusos, A. Yu. Ignatiev y V. A. Kuzmin, publicaron un modelo sencillo que permite que dos fermiones idénticos llenen un estado. Interesados por la proposición, Oscar W. Greenberg y Rabindra N. Mohapatra, de Maryland, decidieron elaborar una teoría más completa basada en ese modelo. Publicaron sus resultados el año pasado en *Physical Review Letters*. La nueva teoría permite la existencia de ciertos estados "parónicos", en los que dos fermiones idénticos podrían ocupar simultáneamente un mismo estado, violándose el principio de exclusión.

Si existen los estados parónicos, deberían poderse observar. Por ejemplo, en un átomo parónico, dos electrones de espines paralelos llenarían una de las órbitas. Esos electrones interactuarían de modo distinto de como lo hacen los de espín antiparalelo, por lo que el nivel de energía de una órbita parónica no sería igual que el de la órbita normal. La diferencia debería manifestarse en forma de minúsculas aberraciones de la radiación emitida cuando los electrones saltan entre órbitas atómicas.

Daniel E. Kelleher, de la Oficina estadounidense de Pesos y Medidas, emprenderá la búsqueda del más sencillo de esos átomos, el helio parónico. El espín hace que el electrón se comporte como una barra imantada y le confiere un momento magnético. En un átomo de helio normal, los dos electrones presentan espines antiparalelos, por lo que sus momentos se anulan. Por el contrario, en el helio parónico, los espines son paralelos y los momentos magnéticos se suman. Kelleher empleará un imán para extraer esos átomos de una muestra de helio líquido. Mediante espectroscopía láser se revelaría entonces si alguno de los átomos seleccionados presenta la energía del estado fundamental correspondiente al helio parónico, que difiere de la del helio ordinario en una parte en 15.000. Robert L. Park, Erik J. Ramberg y Richard L. Talaga, de Maryland, proponen otras dos búsquedas con elementos distintos.

Se tardará varios años en disponer de los resultados. Mientras, Greenberg y Mohapatra examinan las consecuencias de su teoría. Además del principio de exclusión, la nueva interpretación viola el teorema de la ruptura de la paridad (CPT), pilar de la teoría cuántica. Podría salvarse la situación, afirma Greenberg, introduciendo las dimensiones espaciales que, según afirman los teóricos de cuerdas, se enroscan alrededor de cada partícula. Greenberg hipotetiza que el CPT y el principio de exclusión sólo se violarían en el espacio-tiempo ordinario, pero que podrían conservarse en el espacio-tiempo que incluyera esas dimensiones ocultas. Si la idea da resultados satisfactorios, dice, podría alcanzarse la anhelada demostración experimental de la teoría de cuerdas.

Tormenta de hielo

Hace dos años, Louis A. Frank, un respetado físico de la Universidad de Iowa, encendió una acalorada disputa científica. Junto con sus colegas John B. Sigwarth y John D. Craven, afirmó que contra la atmósfera superior terrestre chocan anualmente millones de objetos, a modo de cometas, que, formados en su mayor parte por hielo, se vaporizan en la colisión. Frank y sus colegas fueron objeto de duras críticas. La sorpresa de la comunidad científica resultó mayúscula cuando, a finales de marzo, un físico del Laboratorio de Propulsión a Chorro, de Pasadena, anunció que había obtenido imágenes telescópicas de objetos que parecían tan numerosos como los propuetos por Frank.

Las pruebas recogidas por el propio Frank consistían en observaciones, desde satélite, de la luz ultravioleta emitida por la atmósfera terrestre. Las observaciones indicaban que, cada pocos segundos, aparecía súbitamente en algún punto del globo una mancha negra de centenares de kilómetros de diámetro que contrastaba con el fondo de emisión ultravioleta ("como una mosca en el receptor de televisión", la describió Frank); al cabo de uno o dos minutos se disolvía. De acuerdo con la interpretación de Frank, las manchas son descargas súbitas de vapor de agua procedente de la descomposición de uno de sus hipotéticos objetos: la liberación de vapor de agua absorbería la luz ultravioleta que se emite por debajo. Si Frank está en lo cierto, en el trancurso del tiempo esos objetos nunca vistos podrían haber aportado suficiente vapor de agua para llenar los océanos, lo cual modificaría de raíz las ciencias del sistema solar.

Imposible, afirmó la mayoría de los científicos. Si cada pocos segundos chocaran contra la atmósfera cometas de hielo lanzados a velocidades de 10 kilómetros por segundo, como suponía Frank, la luna presentaría muchos más cráteres, pues carece de atmósfera que los detenga. Frank respondió a ello que sus cometas eran demasiado livianos y esponjosos (de unos pocos centenares de toneladas y unos 10 metros de diámetro cada uno) para abrir cráteres. ¿Por qué, preguntaron los críticos, no se distinguían los objetos con el telescopio o el radar? Frank ya tenía preparada la respuesta: están recubiertos de un oscuro polvo de carbón que impide su visión y no refleja el radar.

Thomas M. Donahue, de la Universidad de Michigan, midió entonces la cantidad de hidrógeno que se encuentra en el espacio interplanetario; encontró menos de lo que podía esperarse que hubiera escapado de los objetos postulados por Frank. Propuso, por tanto, un nuevo tipo de estructuras y afirmó que su concentración era 10 millones de veces menor que la descrita por Frank, quien replicó que el polvo que envolvía sus cometas retenía el hidrógeno en su interior. En opinión de muchos, los sucesivos refinamientos a que Frank sometió su teoría sin disponer de datos más sólidos resultaron fatales para su credibilidad.

A finales del año pasado, Clayne Yeates, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, decidió emprender la búsqueda directa de los objetos de Frank. Utilizó para ello el sensible telescopio "Spacewatch", del Observatorio de Kitt Peak, Arizona. El aparato dispone de un campo de visión muy ancho y, en

vez de película, emplea un detector de carga acoplada. Yeates dirigió el telescopio hacia el firmamento, hacia la órbita donde Frank situaba sus cometas.

Su detector captó ciertas "rayas", aparentemente representantes de objetos cuya luminosidad, posición y cantidad se correpondían estrechamente con los objetos de Frank. Yeates y su colega Tom Gehrels, de la Universidad de Arizona, están seguros de haber descartado todas las explicaciones atribuibles a fenómenos conocidos. Gehrels señala que, como ocurre en el caso de las manchas oscuras de Frank, aparecen más rayas de lo habitual cuando se producen lluvias de meteoritos. Gehrels supone que los objetos podrían ser restos secos de cometas extinguidos, y que esos desechos podrían ofrecer una explicación tan verosímil de las manchas oscuras de Frank como las bolas de hielo.

Amor en vuelo

Todos conocemos el canto de las ranas, de los grillos e incluso de las cigarras. Parece ahora que también la mosca del vinagre entona melodías románticas. Cuando un macho de ese insecto se topa con una hembra, reacciona emitiendo un canto de cortejo. En principio no hay en ello nada extraordinario, pero lo que distingue esas moscas de otros animales es la rica variedad de su repertorio.

Ronald R. Hoy, de la Universidad de Cornell, Anneli Hoikkala, de la finlandesa de Oulu, y Kenneth Kaneshiro, de la Universidad de Hawai, presentan el descubrimiento en *Science*.

Los autores registraron los cantos de tres especies de *Drosophila* y los sometieron a análisis osciloscópico. Distinguieron cuatro categorías acústicas de sones: trenes de "clics", como los producidos por las cigarras; trenes de pulsaciones complejas, como los de los grillos; trenes de pulsaciones sencillas y tonadas sencillas. También presenta una gran variedad el modo de emisión de esos cantos. Así, los trenes de "clics", producidos por los machos de *D. fasciculisetae*, están formados por breves descargas de pulsaciones de alta frecuencia (de seis kilohertz, en promedio) generadas por la vibración de la base del ala. Pautas de alta frecuencia similares se habían registrado en cigarras y saltamontes, pero no se sabía que también las emitieran las moscas.

Los trenes de pulsaciones complejas grabados de *D. cyrtoloma* constan de entre dos y siete pulsaciones cíclicas seguidas de un largo trino. Presentan un ritmo complejo, producido por el macho golpeándose las alas con una cadencia binaria. Los trenes de pulsaciones sencillas y las tonadas sencillas son obra de los machos de *D. silvestris*. Los primeros vienen a ser ronroneos, formados por un tren de pulsaciones cíclicas de sonido generado por el abdomen. Las tonadas sencillas se producen cuando el macho, manteniendo la cabeza debajo del ala de la hembra, vibra rápidamente las suyas.

Hoy y su equipo descubrieron esas cuatro categorías de cantos tras el estudio de sólo 20 especies, todas pertenecientes a un subconjunto de moscas del vinagre representado en Hawai por 106 especies. No resulta insignificante la prevalencia de esos insectos en Hawai: en ningún otro lugar presentan tanta diversidad taxonómica como en ese archipiélago, que aloja 500 especies de las 1000 o 2000 existentes.

¿Cómo se explica tal diversidad? El archipiélago hawaiano se generó por actividad volcánica hace entre cinco y seis millones de años; desde entonces, pocos tipos animales han logrado atravesar los más de 3000 kilómetros de océano que lo separan del continente más próximo. Los que sobrevivieron al viaje (en su mayoría formas aladas) encontraron a su disposición innumerables nichos ecológicos, diversificándose por evolución en especies taxonómicamente separadas. Por ejemplo, se cree que las 500 especies de mosca del vinagre que existen en Hawai descienden de una o dos hembras.

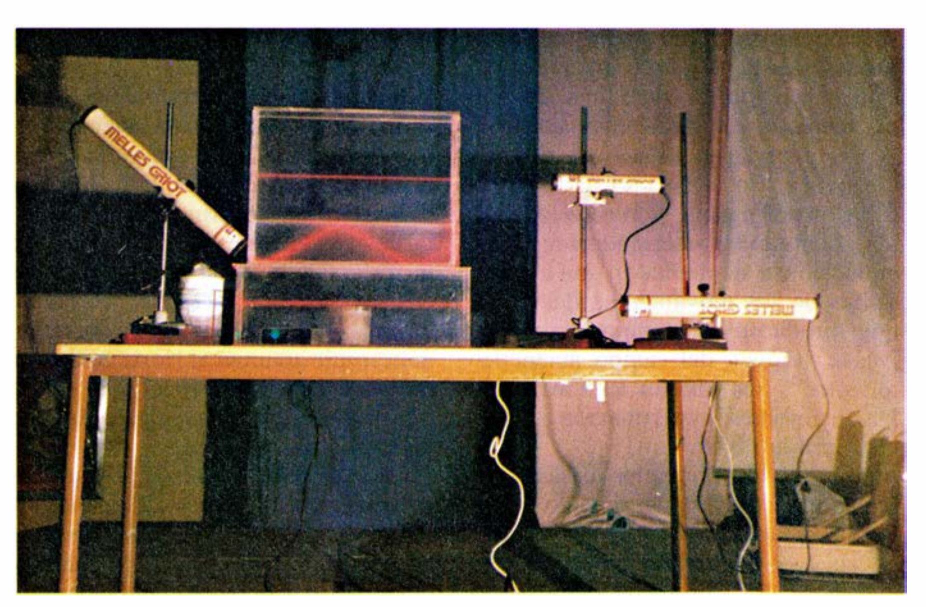
La barraca de la ciencia

La ciencia ha de llegar al pueblo que la sufraga. Este aforismo parece ser la divisa de un programa de divulgación científica animado por el profesor de mecánica estadística de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Manuel García Velarde.

Ante un público, por lo común inexperto, desarrolla conferencias didácticas y, en lo posible, experimentos de cristales líquidos, alto vacío, turbulencia, plasmas, superconductividad, espectroscopía, biofísica, láseres, partículas e interacciones fundamentales, energía solar, control y procesado de alimentos, fibras ópticas y demás temas que se dirían reservados a los ámbitos académicos.

En opinión de García Velarde, esa misión divulgadora correspondería a la UNED y a sus centros asociados. Pero mientras ésta se decide, él sigue adelante con su "Barraca de la ciencia", así llamada en recuerdo del teatro universitario itinerante dirigido por Federico García Lorca y Eduardo Ugarte en los años treinta. El guión de cada clase cambia de acuerdo con la materia a exponer. Así, en la lección sobre el rayo láser, por ejemplo, se combina desde el recurso a la fantasía científica (Leonardo, Bacon, Tolstoi, Fleming, etcétera) hasta el repaso a los puntos físicos básicos de la luz (Einstein, Basoff, Prokhoff, Schwalow, Mainman, Patel...), deteniéndose en la similitud y diferencias entre láseres y fuentes usuales de la luz (bombillas, tubos fluorescentes, etcétera) o en las diversas aplicaciones médicas, estéticas, industriales y demás. El público, comenta García Velarde, ha resistido hasta cuatro horas de "espectáculo".

Diez años se cumplirán muy pronto de esa singular aventura lúdico-científica de la que han disfrutado muchísimos pueblos de la geografía española y en la que han participado también otros destacados científicos.



1. Un típico experimento de óptica de rayos con un láser

Inversiones magnéticas y dinamo terrestre

¿Camina la Tierra hacia una inversión de su campo magnético? Las rocas imanadas por antiguos campos magnéticos ofrecen indicios sobre el mecanismo de inversión subyacente en el núcleo terrestre

Kenneth A. Hoffman

Desde hace más de un siglo, los geofísicos vienen observando un constante y significativo debilitamiento de la intensidad del campo magnético terrestre. Si esta tendencia continuase al ritmo actual, el campo se anularía en tan sólo unos 1500 años. La mayoría de los investigadores se inclina a pensar que la disminución es sólo un aspecto más de la variabilidad inherente al campo, y que éste recuperará su intensidad. Aun así, no se puede descartar la posibilidad de que el debilitamiento presagie un fenómeno que ya ha ocurrido varias veces a lo largo de los tiempos geológicos: la inversión del campo geomagnético.

¿Cuál de estos dos supuestos es el correcto? La respuesta yace escondida a 3000 kilómetros bajo la superficie de la Tierra, en el interior del núcleo externo, masa de metal fundido que gira lentamente aprisionada entre el manto de la Tierra y el núcleo interior sólido. Goza hoy de amplia aceptación la idea según la cual el movimiento de electrones libres en el núcleo externo en convección engendra el campo magnético terrestre. Esta teoría supone que el núcleo se comporta como una dinamo permanente, un dispositivo que convierte energía mecánica en energía magnética. En la dinamo terrestre, la rotación del planeta, junto con los efectos gravitatorios y termodinámicos en el núcleo y a su alrededor, son los causantes de los movimientos del fluido que producen el campo magnético [véase "Origen del campo magnético terrestre", por Charles R. Carrigan y David Gubbins; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1979].

Aunque los principios básicos del funcionamiento de la dinamo están bien asentados, los geofísicos todavía no conocen la termodinámica, mecánica de fluidos y propiedades eléctricas del interior de la Tierra con la profundidad suficiente para construir un modelo inobjetable de la dinamo terrestre. Ello no obsta para que los efectos de su actuación puedan vislumbrarse de manera indirecta: mediante la observación del campo existente en la actualidad. Estas mediciones proporcionan muchos detalles sobre el comportamiento del campo a corto plazo, tales como su morfología y "variación secular", o fluctuación ordinaria. Para estudiar la actividad de la dinamo a lo largo de eones hay que recurrir al archivo paleomagnético: el antiguo magnetismo "congelado" en las rocas en el momento de su formación.

Las indicaciones paleomagnéticas condujeron, en 1906, al físico francés Bernard Brunhes a sugerir la inversión del campo magnético terrestre. Brunhes quedó intrigado por el descubrimiento de rocas que estaban magnéticamente orientadas en sentido opuesto al del campo terrestre. Su sorprendente sugerencia fue objeto de acalorados debates por más de cinco decenios. La mayor parte de la comunidad científica no aceptó la idea hasta principios de la década de 1960, cuando J. S. B. Van Zijl y sus colaboradores publicaron un estudio minucioso de una inversión del campo registrada paleomagnéticamente en lavas sudafricanas. Hoy día se ha convertido en un principio fundamental de geofísica que el campo magnético terrestre puede tomar cualquiera de los dos estados de polaridad: el estado "normal", en el cual las agujas magnéticas que apuntan al Norte se dirigen hacia el Norte geográfico, y el estado "invertido", en el cual están dirigidas hacia el Sur geográfico.

En el decenio de 1960, los estudios de lavas cuyas edades se determinaron radiométricamente dieron por resultado un catálogo seguro de cambios de polaridad ocurridos en el pasado, entre los que se contaban no menos de nueve inversiones importantes en los últimos 3,6 millones de años, la postrera de las cuales había tenido lugar hace 730.000 años. La escala de tiempo de los cambios de polaridad se ha alargado hacia atrás desde entonces hasta llegar casi a los 170 millones de años.

Los archivos paleomagnéticos muestran que el campo geomagnético no se invierte instantáneamente al pasar de un estado de polaridad a otro. Antes bien, el proceso comporta un período de transición que abarca algunos miles de años. De aquí que, durante quizás el 98 por ciento del tiempo, el campo se mantenga estable con una configuración justificable. Pero durante el 2 por ciento restante, el campo es inestable y su estructura no resulta fácil de entender. La principal tarea de los geofísicos de mi especialidad ha sido compilar la crónica del comportamiento del campo en inversión (sus cambios de forma y fluctuaciones de intensidad) basándonos en el archivo de sucesos pasados, a veces apenas discernible y otras complicado, recogido en las piedras. Los descubrimientos constituyen un inapreciable sondeo de los mecanismos ocultos de la dinamo terrestre.

Pautas de la geometría del campo

El archivo paleomagnético ha permitido a los investigadores deducir la geometría de los campos antiguos, durante los periodos estables y durante los inestables. Es bien sabido que, en épocas de polaridad estable, el campo magnético terrestre está dominado por la forma dipolar, similar al que produciría un imán permanente en el núcleo ligeramente inclinado con respecto al eje de rotación de la Tierra. Durante la polaridad normal, una aguja magnética libre (es decir, que puede orientarse en tres dimensiones) apunta siempre hacia el Norte, tendiendo a hun-

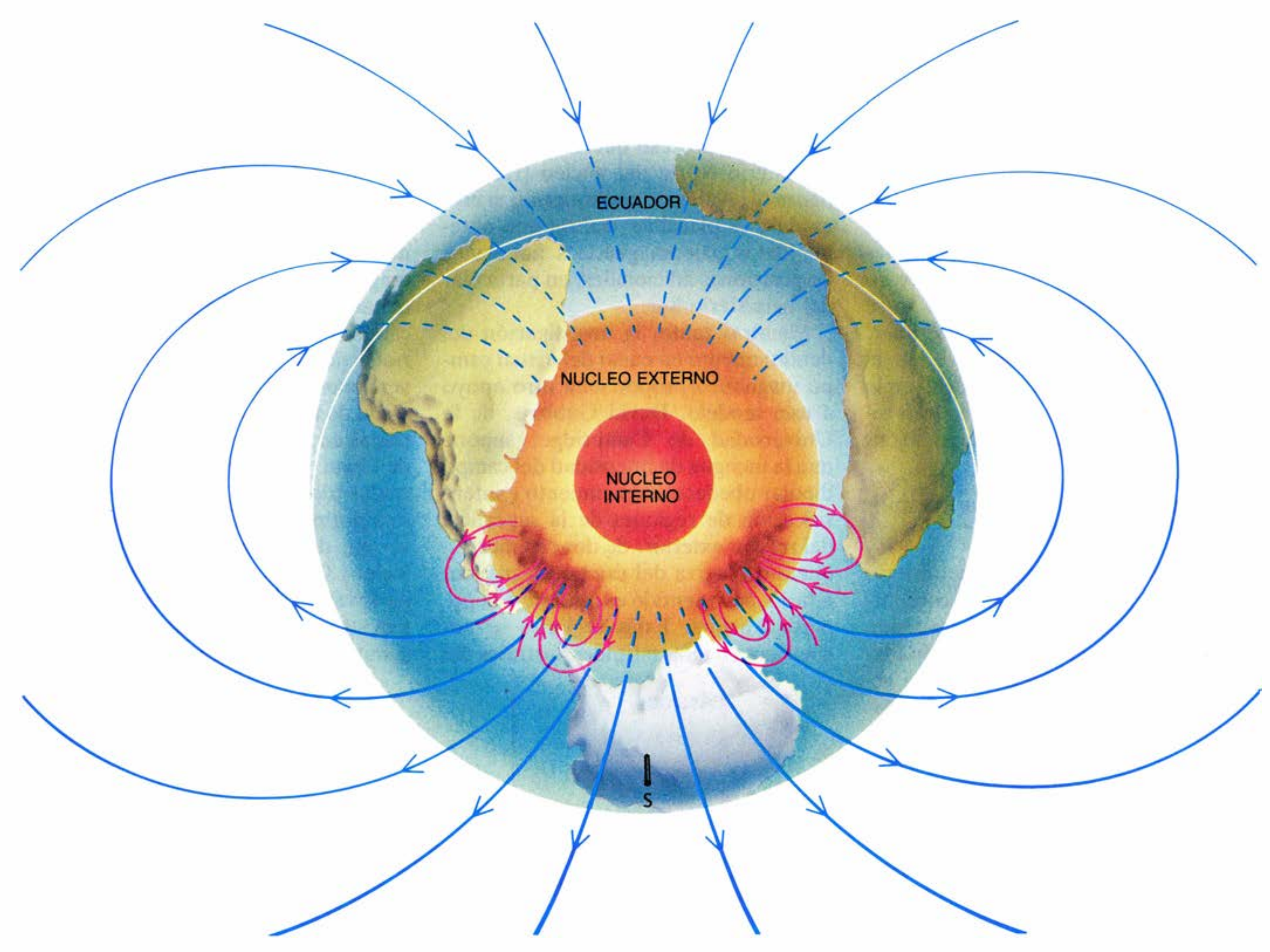
dirse hacia el suelo en el hemisferio Norte mientras que en el hemisferio Sur se levanta hacia el cielo. El ángulo de inclinación depende de la latitud a que esté la brújula. Por el contrario, en épocas de polaridad invertida, la aguja se orientará hacia el Sur, inclinándose hacia arriba en el hemisferio Norte y hacia abajo en el hemisferio Sur.

Pero, ¿qué decir del campo durante el proceso de inversión? La respuesta se puede encontrar examinando archivos de una misma inversión procedente de distintos lugares dispersos por todo el globo. Para cada dirección magnética registrada, se puede determinar la posición del polo magnético a partir de la orientación horizontal y del ángulo de inclinación [*véase la figura 4*]. De aquí que, examinando el cambio de dirección del campo paleomagnético correspondiente a distintos intervalos de tiempo durante una transición, se puede rastrear la posición del polo geomagnético virtual (PGV), o hipotético, al migrar de una polaridad a la otra. Además, si los archivos paleomagnéticos de puntos diferentes conducen a las mismas posiciones para la trayectoria del polo, se puede llegar a la conclusión de un campo dipolar. Pero si los diferentes archivos sugieren trayectorias diferentes del PGV, habrá que admitir que la geometría del campo durante la inversión era más complicada que la del dipolo.

John Hillhouse y el fallecido Allan Cox, ambos entonces en la Universidad de Stanford, fueron los primeros en probar suerte con tal análisis. Estudiaron un archivo que habían descubierto en los sedimentos del lago desecado de Tecopa, en California. Los sedimentos recogían la historia de la inversión más reciente, el cambio de polaridad que tuvo lugar hace unos 730.000 años y llevó el campo de la época inversa de Matuyama a la época normal de Brunhes. Observando que la trayectoria del PGV que se desprendía de sus datos era muy diferente de la asociada a un archivo de sedimentos marinos del Japón, llegaron a la conclusión de que la configuración del campo transitorio era compleja y no dipolar. Archivos paleomagnéticos semejantes de la misma inversión, procedentes de otros puntos, indicaban trayectorias de los PGV enteramente dispares [*véase la figura 5*].

Suponiendo que estos datos sean fidedignos, ¿cabe analizarlos de alguna otra manera para ayudarnos a determinar la geometría del campo transitorio durante la inversión Matuyama-Brunhes? Como no se puede aceptar que el campo en inversión sea dipolar, el método del PGV descrito arriba sirve de poco. Para analizar los datos hay que emplear otro método, sin necesidad de hipótesis previas acerca de la forma del campo. El método empleado ahora por el autor consiste en tomar la dirección de los vectores del campo paleomagnético en cada punto y construir la trayectoria de los vectores sobre una "esfera direccional" [*véase la figura 4*].

Para la inversión de Matuyama-Brunhes disponemos ya de muchos archivos localizados en puntos dispersos por todo el hemisferio Norte. Podemos, pues, comparar los datos trazando todas las trayectorias direccionales sobre la misma esfera [*véase la figura 5*]. Al hacerlo aparece una interesante

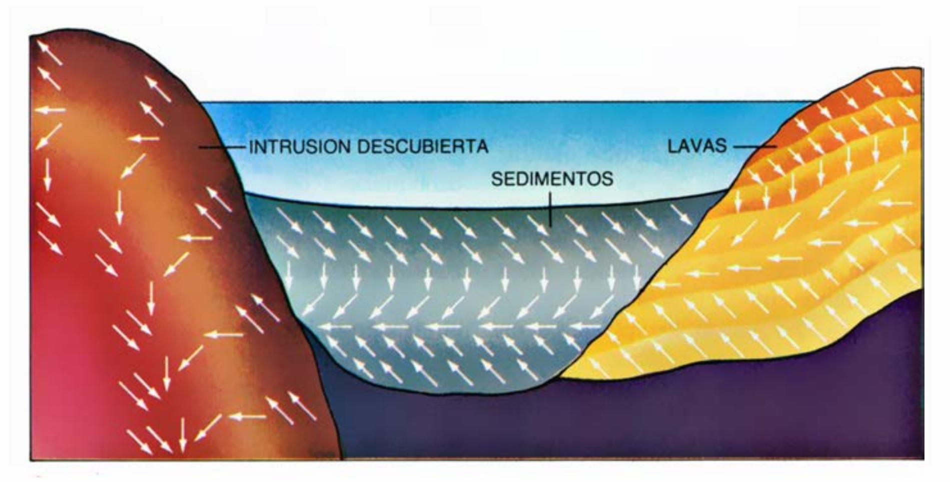


1. LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO (*azul*) dimanando del núcleo exterior fundido de la Tierra, según se ve en este dibujo del planeta. David Gubbins, de la Universidad de Cambridge, ha demostrado la existencia de zonas donde las líneas del campo poseen orientación opuesta (*rojo*), cerca de las puntas de Africa y América del Sur. Estas "manchas del núcleo" pueden explicar el debilitamiento observado del campo magnético. Las manchas, que aumentan de tamaño e intensidad, avanzan hacia el Sur. David Gubbins sugiere que éste puede ser el proceso que acabe por invertir el campo magnético terrestre.

núcleo, bajo las puntas de Africa y América del Sur [*véase la figura 1*]. Se cree que están asociadas a zonas calientes del manto más bajo, justo por encima del núcleo externo. En opinión de Gubbins, de continuar esta tendencia el sentido del dipolo puede acabar por invertirse.

Los descubrimientos de Gubbins dan pie a sospechar que el cambio de inverso a normal del suceso Matuyama-Brunhes y el posible comienzo de una transición de normal a inverso en nuestros días sean, ambos, consecuencia de un proceso similar iniciado en el hemisferio Sur del núcleo. Si así fuera, las líneas de fuerza del campo magnético terrestre deberían, con el paso del tiempo, cambiar de dirección de una manera similar, aunque antipódica, al comportamiento observado durante la inversión Matuyama-Brunhes. En otras palabras, sería de esperar que las brújulas de todo el mundo describiesen una trayectoria confinada en el plano vertical. En contraste con el comportamiento de las hipotéticas brújulas durante la inversión Matuyama-Brunhes, sin embargo, las agujas magnéticas en ambos hemisferios deberían girar hacia arriba, y no hacia abajo.

Mas, ¿qué razón hay para creer que la inversión de la dinamo se vaya a repetir de esta forma? ¿Existen "puntos calientes" dentro del núcleo que desencadenan las inversiones del campo geomagnético? La verdad es que disponemos de una excelente indicación paleomagnética de que el proceso desencadenante en el núcleo puede persistir sin cambios esenciales a lo largo de un período de tiempo que incluye varias inversiones. La prueba más notable proviene de una serie de inversiones registradas en sedimentos marinos en la isla de Creta. De cuatro transiciones registradas (dos de las cuales eran de inverso a normal y otras dos de normal a inverso), documentadas por Jean-Pierre Valet y Carlo Laj, del Centro Nacional de Investigación Científica francés, los tres sucesos más antiguos muestran un comportamiento direccional del campo



2. LAS ROCAS registran y conservan la dirección (*flechas*) del campo magnético terrestre de la época en que se formaron. Las rocas ígneas contienen gránulos magnéticos cuyos momentos magnéticos se orientan con el campo dominante conforme la roca se enfría. Las coladas de lava (*amarillo*) se enfrían rápidamente y proporcionan la más exacta "instantánea" del campo paleomagnético. Debido a la irregularidad de las erupciones, tales archivos pueden adolecer de importantes vacíos. Las intrusiones (*castaño*), formadas por magma enfriado bajo el suelo a lo largo de miles de años, ofrecen un registro sin esos saltos; ahora bien, como tardan mucho tiempo en enfriarse la orientación del campo que registran puede ser el promedio resultante de un intervalo de tiempo. Las intrusiones se enfrían hacia dentro; por tanto, el registro paleomagnético más antiguo es el de la superficie y el más moderno es el del interior. Los sedimentos (*gris*) contienen granos magnéticos que se van alineando con el campo y quedan fijados con la consolidación del sedimento.

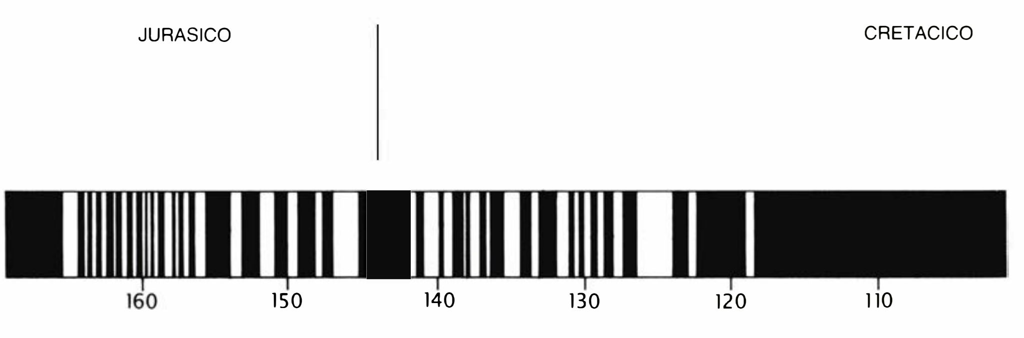
propiedad: durante el cambio de polaridad de inverso a normal, la mayoría de los vectores del campo intermedio —los que se desvían más de 30 grados respecto a cualquiera de las direcciones del campo dipolar axial (o "pseudopolos")— barren velozmente la "parte de abajo" de la figura. Es decir, si uno imagina que, en todo el hemisferio Norte, las agujas magnéticas que buscan el Norte están virando desde el Sur geográfico al Norte conforme el campo invierte su polaridad, la mayoría de las agujas se inclinarían hacia abajo, y no hacia arriba. Además, las agujas no se desviarían del plano vertical Norte-Sur. Así, pues, podemos concluir que el campo transitorio no varía mucho en la dirección Este-Oeste y resulta casi simétrico con respecto al eje de rotación.

¿"Puntos calientes" en la dinamo terrestre?

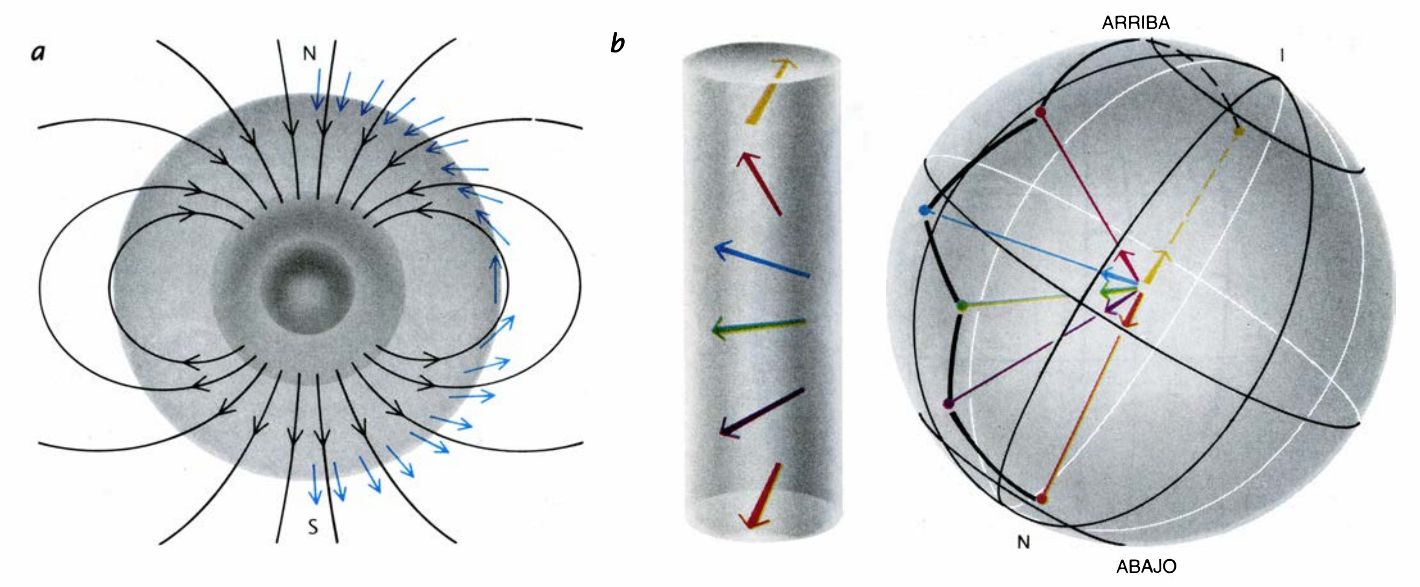
Si todos los puntos del hemisferio Norte hubieran registrado un comportamiento similar durante la inversión de Matuyama-Brunhes, habría fundados motivos para sospechar que la actividad subyacente en el núcleo terrestre fuera también aproximadamente simétrica alrededor del eje de rotación. Simetría axial que puede explicarse admitiendo que el proceso de inversión comienza en el interior de bandas latitudinales —por tanto simétricas respecto al eje— del núcleo fluido [*véase la figura 6*]. Tales bandas estarían asociadas a líneas locales del campo orientadas en sentido opuesto a las del campo general. Las bandas podrían ir dilatándose, inundando poco a poco el resto del núcleo y dando lugar a una inversión completa del campo entero.

Los datos de Matuyama-Brunhes imponen ciertas limitaciones a tal teoría: están en buen acuerdo con los modelos en los que este proceso se inicia cerca del plano ecuatorial del núcleo o en su hemisferio Sur, pero discrepan en el caso de un proceso que se inicie en el hemisferio Norte del núcleo [*véase la figura 6*]. Antes de poder decidir si este modelo es plausible, habría que obtener datos paleomagnéticos fidedignos de posiciones adicionales, en particular del hemisferio Sur.

Mientras tanto, la investigación del debilitamiento en curso del actual campo magnético proporciona otro apoyo a este modelo. David Gubbins, de la Universidad de Cambridge, supone que la mengua de intensidad del campo dipolar obedece al crecimiento e intensificación de regiones de la superficie del núcleo exterior, de donde emergen líneas de fuerza del campo magnético, o flujo, cuyo sentido es opuesto a la polaridad actual. Estas regiones se encuentran en altas latitudes australes del



3. ESCALA DE TIEMPO de las inversiones magnéticas durante los últimos 170 millones de años, deducida de la configuración del campo magnético observada sobre la corteza oceánica. El fondo oceánico en expansión



4. CAMPO DIPOLAR y su forma claramente definida (*a*). Para una paleodirección dada, se puede deducir la posición del polo magnético, o polo geomagnético virtual (PGV), una vez conocidas la dirección del vector horizontal y el ángulo de inclinación. Se puede analizar una inversión trazando el recorrido del PGV mientras va cambiando la polaridad del campo. Este método no es del todo adecuado para campos más complejos. Una "esfera direccional" (*b*) no necesita hipótesis alguna sobre la forma del campo. Se supone que la esfera contiene un puesto de observación. Se puede imaginar que un observador, situado en él, vaya inscribiendo sobre la superficie de la esfera las direcciones indicadas por una aguja magnética libre. En la práctica, se pueden tomar las direcciones del campo archivadas en estratos de rocas, tales como el cilindro vertical de sedimento ilustrado en la figura, y representar el trayecto marcado (la hodógrafa) por el vector campo durante la inversión magnética (*línea negra*). "Arriba" y "abajo" son puntos de referencia que corresponden a los sentidos hacia arriba y hacia abajo de la vertical. Los "pseudopolos" (*N*, *I*) representan direcciones asociadas con campos dipolares axiales puros, dotados de polaridad normal o inversa. El "ecuador" define todas las direcciones separadas 90 grados de cada pseudopolo, a mitad de camino entre ambos. (Dibujos realizados por Jan Worpole.)

que revela un mecanismo subyacente similar en el núcleo. Los dos sucesos de inverso a normal describen trayectorias antipódicas de las del suceso de normal a inverso. (En contraste con la inversión Matuyama-Brunhes, estos episodios se caracterizaron por intensos movimientos de Este a Oeste.)

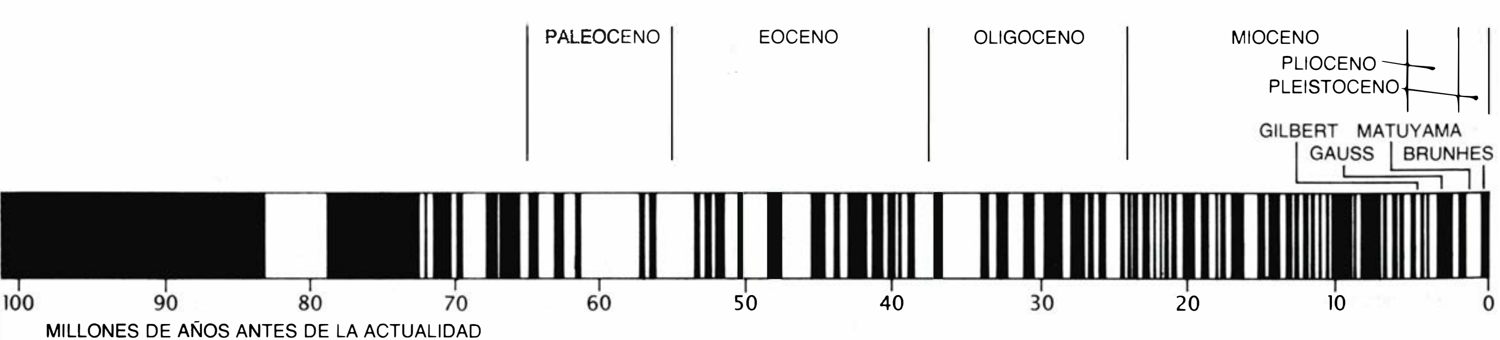
De acuerdo con la interpretación más razonable del descubrimiento, la geometría del proceso de inversión en el núcleo no cambió durante todo el intervalo de tiempo —bastante más de un millón de años— abarcado por los tres sucesos. Si se encontrasen otras series de registros paleomagnéticos contemporáneos que mostraran rasgos similares, la confianza en esta interpretación aumentaría sin duda.

Debe señalarse también que, de la misma manera que en el proceso de inversión las cosas se repiten, existe también cierta variabilidad. Por ejemplo, el cuarto y último de los archivos de transiciones de Creta muestra cambios direccionales que son diferentes de los que nos ofrecen los registros más antiguos; ello sugiere que el proceso desarrollado en el núcleo altera sus características espaciales de tiempo en tiempo. Otras inversiones consecutivas, de las que han informado Scott W. Bogue y Rob S. Coe, de la Universidad de California, y Bradford M. Clement y Dennis V. Kent, del Lamont-Doherty, muestran inversiones consecutivas en las que las direcciones del campo siguen caminos semejantes y no antipódicos. Estos descubrimientos sugieren que, después de una transición, la dinamo se "rebobina" a veces como una película que empiece por el final.

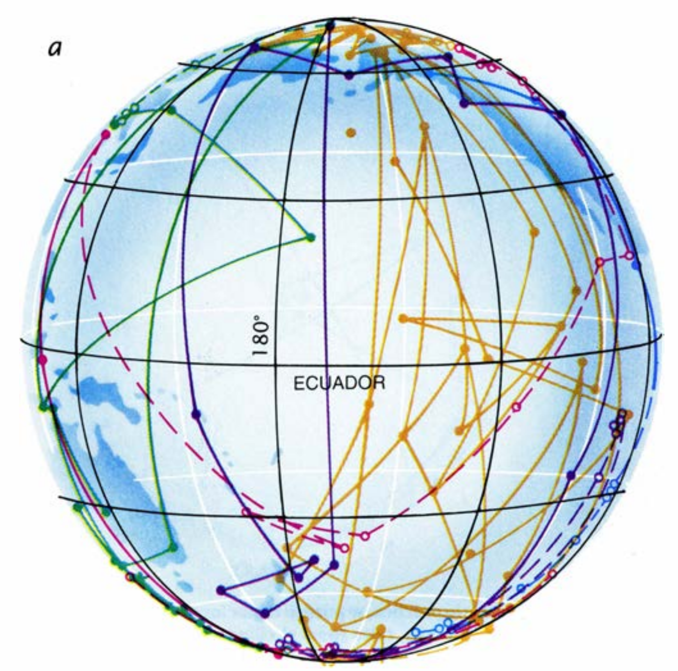
Excursiones y retornos

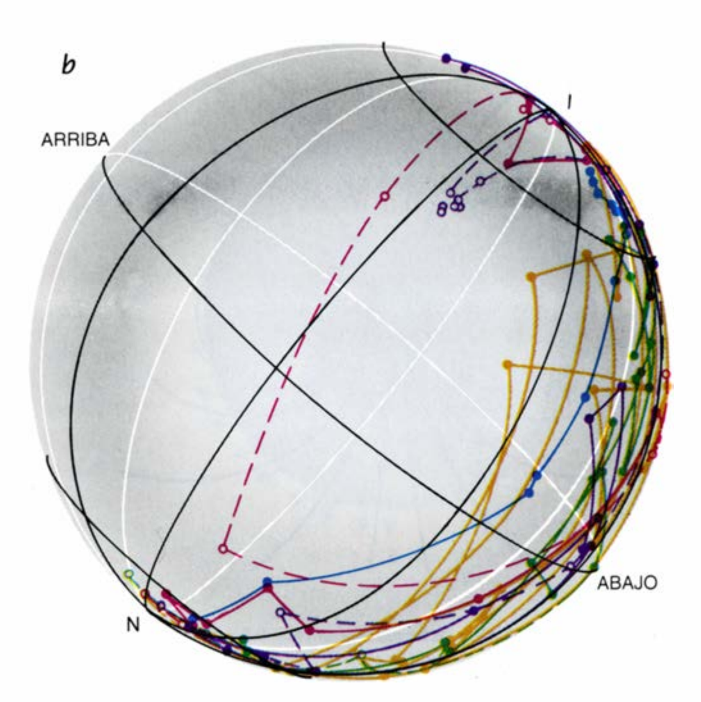
Las inversiones "rebobinadas" hacen pensar si no será que la dinamo no consigue terminar el proceso de inversión y acaba volviéndose atrás. Una pregunta semejante surge de la observación de las excursiones geomagnéticas, o grandes saltos en la dirección del campo, fenómeno que desde hace tiempo se ha introducido en la bibliografía paleomagnética. La cuestión principal relativa a esas excursiones es si se producen en tiempos de variación secular anormal, sin relación con el fenómeno de las inversiones de polaridad, o si son manifestaciones de intentos de inversión abortados o fallidos.

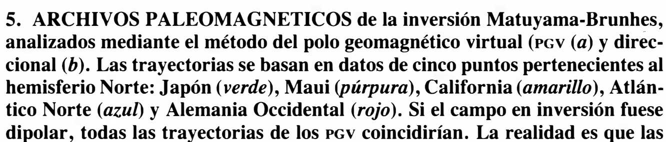
Un indicio de la existencia real de una relación entre ciertas excursiones geomagnéticas e inversiones de polaridad lo tenemos en una secuencia de lavas de 34 millones de años de antigüedad en el volcán Liverpool, en Australia oriental. El autor ha hallado que esas coladas de basalto registran una serie de tres desviaciones, aparentemente rápidas, de la polaridad inversa, hasta alcanzar una orientación del cam-



conserva registrada la historia del antiguo campo terrestre, en los basaltos procedentes del magma que aflora por las dorsales oceánicas. La distribución de las inversiones varía sustancialmente. Durante el Cretácico hubo una pausa de 35 millones de años. La escala de tiempo se basa en el trabajo de Allan Cox.





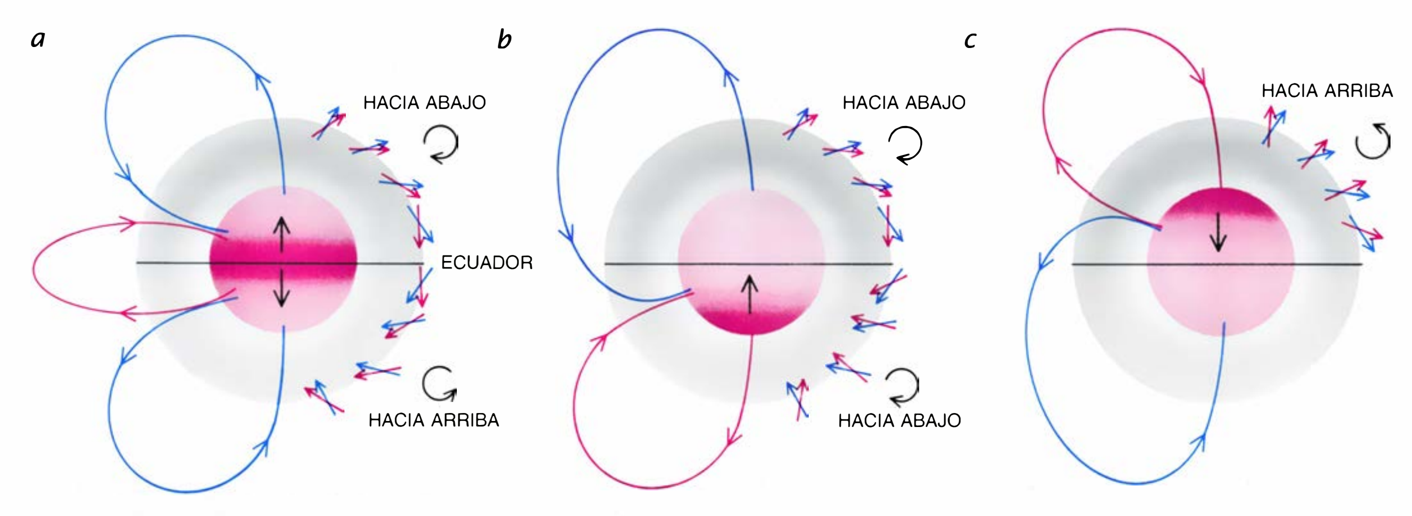


5. ARCHIVOS PALEOMAGNETICOS de la inversión Matuyama-Brunhes, analizados mediante el método del polo geomagnético virtual (PGV (*a*) y direccional (*b*). Las trayectorias se basan en datos de cinco puntos pertenecientes al hemisferio Norte: Japón (*verde*), Maui (*púrpura*), California (*amarillo*), Atlántico Norte (*azul*) y Alemania Occidental (*rojo*). Si el campo en inversión fuese dipolar, todas las trayectorias de los PGV coincidirían. La realidad es que las trayectorias se separan mucho, y ello prueba que el campo no era dipolar. El análisis direccional revela que, durante la transición, los vectores del campo tendían, en todos los puntos considerados, a inclinarse hacia abajo. Eso da a entender que los movimientos en dirección Este-Oeste fueron pequeños durante la inversión, y de aquí que el proceso debió ser casi simétrico con respecto al eje terrestre. Los datos de Maui figuran aquí por cortesía de Rob S. Coe.

po intermedio muy semejante [*véase la figura 8*]. Las dos primeras de esas desviaciones parecen ser excursiones, pues las lavas inmediatamente posteriores registran la misma dirección de polaridad (inversa) que dominaba antes de la excursión. Las lavas procedentes de las erupciones que siguieron tras la tercera desviación poseen, por el contrario, polaridad normal, lo que indica que la inversión se coronó con éxito.

Los datos del Liverpool están de acuerdo con el argumento, originario de John Shaw, del University College Cardiff en Gales, según el cual el proceso de inversión puede llevar consigo un estado intermedio de la dinamo. Dicho estado intermedio parece constituir una suerte de trampolín desde el cual se realizan los intentos de inversión, tanto los que finalizan con éxito como los que fracasan. Esas direcciones intermedias del campo, relativamente estables (puntos de espera) y muy comunes, sugieren que ciertas geometrías del campo pueden ofrecer estados de energía preferidos por la dinamo durante los sucesos de inversión.

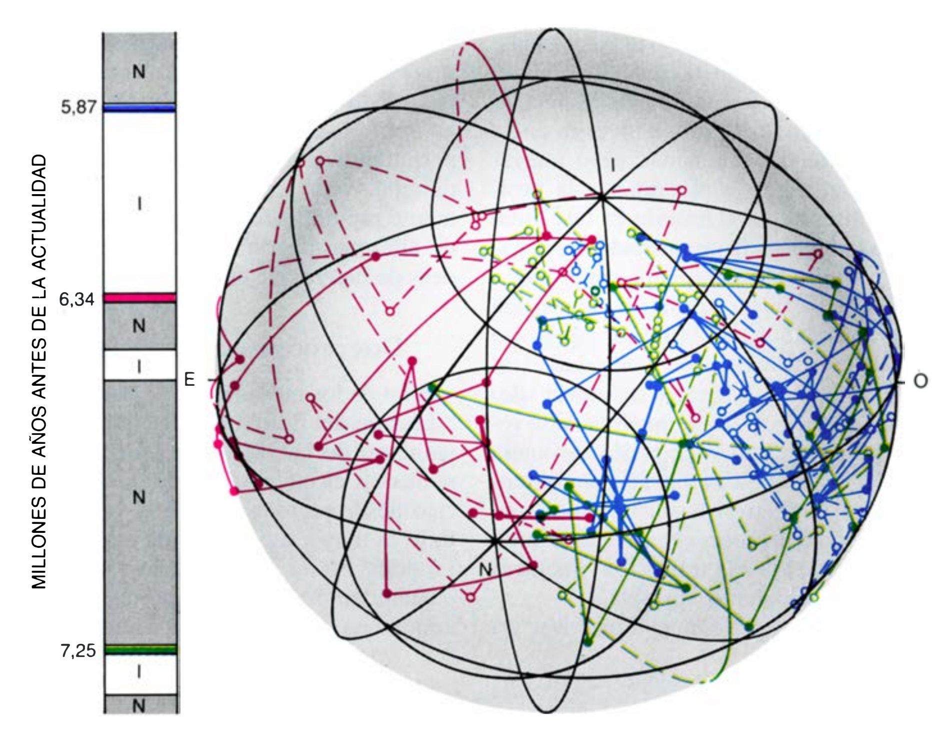
El primer investigador que informó de direcciones intermedias aparentemente estables fue Norman R. Watkins, de la Universidad de Rhode Island, quien a fines del decenio de 1960 realizó un estudio de la transición de campo inverso a normal acaecida hace 15 millones de años y registrada en las lavas del monte Steens, en el sureste de Oregón. La cantidad de información contenida en estos archivos de lava no tiene rival: se compone de numerosas coladas sucesivas que han retenido la dirección del campo en unos 55 mo-



6. LA ASIMETRIA durante la inversión de Matuyama-Brunhes quedaría explicada mediante un proceso que comienza con una banda latitudinal (*rojo oscuro*) en el núcleo fluido que produce un campo opuesto al dominante. El campo que se muestra aquí comienza en el estado de dipolo inverso (*flechas azules*); las flechas, que se comportan como brújulas orientadas al Norte, apuntan hacia el polo Sur geográfico. Una banda ecuatorial que se extendiese hacia el Norte y hacia el Sur (*a*) determinaría que los vectores campo (*flechas rojas*) en el hemisferio Norte girasen hacia abajo (*flechas negras*). Una banda que se iniciase cerca del polo Sur geográfico y se extendiese hacia el Norte (*b*) haría que los vectores del campo se inclinasen hacia abajo. Pero una banda que naciese cerca del polo Norte geográfico (*c*) daría por resultado una rotación hacia arriba, lo que es contrario a lo observado. Los datos del hemisferio Sur revelarían si el proceso de inversión se inició cerca del plano ecuatorial, en cuyo caso los vectores del campo girarían hacia arriba, o comenzó más al Sur (giro hacia abajo).

mentos distintos durante la inversión. Debido a la escasez de archivos paleomagnéticos tan completos y con tan alta resolución de un campo en inversión, las lavas del monte Steens se han convertido en el foco de una activa investigación.

El trabajo resultante ha mostrado que el esfuerza valía la pena. El estudio que llevaron a cabo Coe, Michel Prévot, de Montpellier, Francia, y Edward A. Mankinen y C. Sherman Grommé, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, suministró la información más detallada hasta la fecha sobre el comportamiento direccional del campo y la modificación de su intensidad durante un cambio de polaridad. De acuerdo con sus resultados, el proceso desarrollado en el núcleo es bastante complejo. Una aguja magnética libre ubicada en el monte Steens habría descrito al principio una trayectoria hacia abajo, más o menos. Pero, tras alcanzar el campo cierta orientación intermedia, la aguja realizaría un rápido salto direccional hasta llegar a la polaridad normal. La nueva polaridad, sin embargo, no duró mucho, pues lo que se observa a continuación es un nuevo salto direccional, en virtud del cual el vector campo rebotó tornando a la misma orientación intermedia. Después del rebote, la dirección del campo describió un bucle hacia el Este, mientras se acercaba de nuevo a la polaridad normal. Esta vez, el cambio de polaridad acabó con éxito.



7. TRES INVERSIONES SUCESIVAS, registradas en sedimentos de Creta, que parecen haberse iniciado de la misma manera. La inversión más antigua (*verde*) y la más moderna (*azul*), cambiando ambas el campo de la polaridad inversa a la normal, siguieron sus caminos por la mitad occidental de la esfera. La inversión intermedia (*rojo*), de polaridad normal a inversa, siguió un camino por el Este. El comportamiento antipódico sugiere que espacialmente el proceso desarrollado en el núcleo sería el mismo en los tres sucesos.

La dinamo que se para y se pone en marcha

Las lavas del monte Steens dan la clara impresión de que los cambios de polaridad llevan consigo una especie de comportamiento de parada y arranque por parte de la dinamo. Además, los investigadores razonan que, como los saltos observados hacen retornar el vector campo a la misma posición intermedia, los saltos no se deben a la falta de información en los registros, sino a rápidas variaciones en la dirección del campo que tardan en producirse tal vez sólo unos años. Atestigua esta idea el descubrimiento de importantes diferencias en la dirección del campo paleomagnético entre los bordes de una colada de lava, que se enfrían rápidamente, y la parte central, que lo hace lentamente. Si estos resultados son fidedignos, es de suponer que durante la inversión ciertos mecanismos capaces de alterar rápidamente el flujo magnético intervendrán de una manera decisiva en el núcleo.

Para someter a prueba la confianza que depositamos en esta interpretación conviene comparar los registros del monte Steens con otros contemporáneos, preferiblemente de un lugar próximo, recurriendo a otros materiales que proporcionen datos más continuos que las intermitentes coladas de lava. Por desgracia, resulta difícil obtener registros de transiciones, cualquiera que sea su clase. Sin embargo, una inversión de un periodo semejante ha dejado un registro detallado en la intrusión de Tatoosh en el monte Rainier, no lejos del Steens. A pesar de que el cambio de polaridad de inverso a normal registrado en esta intrusión es, con toda probabilidad, un suceso distinto del ocurrido en el monte Steens, los dos registros ofrecen rasgos comunes.

Michael D. Fuller y sus colaboradores, de la Universidad de California en Santa Bárbara, han escrito que los primitivos cambios de dirección recogidos en los archivos de la intrusión Tatoosh están dominados por lo que parecen ser rápidos movimientos hacia una posición intermedia, en la cual el campo quedó más o menos estabilizado. El campo fracasó luego en un intento de inversión: un acercamiento a la polaridad normal, que se perdió porque el campo regresó hasta aproximadamente la misma posición intermedia, siguiendo una pauta que recuerda el rebote observado en el archivo del monte Steens. Tras este fracaso, el cambio de polaridad se coronó con éxito.

Así, pues, dos clases de archivos —el de las lavas del monte Steens y el de la intrusión Tatoosh— corroboran la hipótesis según la cual, durante los intentos de inversión, el campo se puede mover rápidamente o permanecer estacionario, sufrir retornos direccionales y fracasar en su pretensión de completar el proceso de inversión. Conviene anotar que, en otra inversión de la misma época geológica, estudiada por Laj y sus colaboradores, que obtuvieron sus datos en la isla griega de Zakinthos de un tercer tipo de registro paleomagnético —sedimentos marinos—, se ha encontrado un comportamiento similar.

Hasta ahora nos hemos limitado a los aspectos direccionales del campo en inversión. Pero la comprensión cabal de la actividad subyacente de la dinamo requiere también cierto conocimiento sobre los cambios de intensidad del campo, o paleointensidad, que concurren en el proceso. Cierto es que cuesta muchísimo más determinarlos. A pesar de todo, en muchos puntos se han obtenido ya datos de intensidad que indican que las orientaciones intermedias tienden a ir asociadas con débiles intensidades, que algunas veces quedan reducidas hasta el 10 por ciento del valor observado con polaridad estable.

De nuevo, el grueso de la información sobre cambios de intensidad procede del episodio de inversión registrado en el monte Steens. El campo re-

cobró la intensidad previa a la transición durante un primer intento fallido de inversión, cuando le faltaba poco para llegar a la polaridad inversa, antes del rebote. La intensidad cayó nuevamente al regresar el campo a la posición intermedia. Durante la fase final de la inversión, la intensidad parece haber variado bastante, superando incluso la del campo ordinario, a medida que la dinamo recobraba el equilibrio en el nuevo estado de polaridad. Los resultados provisionales del autor, deducidos del estudio de una inversión registrada en las lavas de la isla hawaiana de Molokai, indican que las paleointensidades fluctuaron hasta un valor que triplicaba con creces el correspondiente a la fase previa a la transición, mientras el campo dipolar se restablecía.

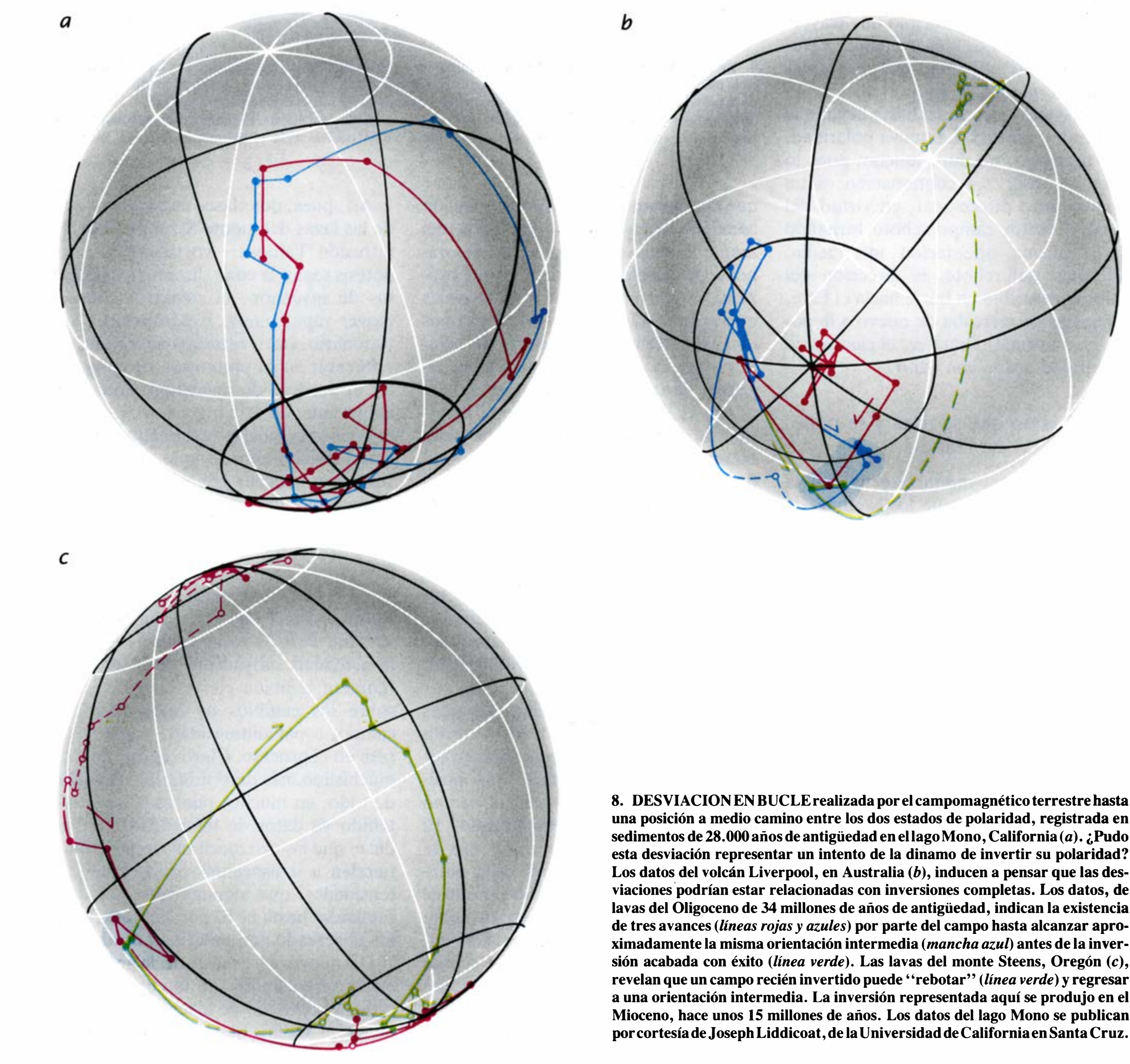
El registro paleomagnético nos va perfilando la imagen de una geodinamo reversible capaz de variar lenta o rápidamente tanto en la dirección como en la intensidad. Los principios físicos permiten dos mecanismos básicos de dinamo, uno lento y otro potencialmente rápido, mediante los cuales puede alterarse la configuración de las líneas de fuerza que emergen del núcleo.

Dos procesos en el núcleo

Uno de los mecanismos se basa en la "difusión del flujo", que facilita el movimiento de las líneas de fuerza magnética en el interior del fluido del núcleo desde regiones donde el valor del flujo es mayor a otras donde es menor. La difusión, un proceso pasivo, abre la posibilidad de que el campo disminuya aunque no deja que vuelva a aumentar.

Ahora bien, el campo dipolar está menguando a un ritmo 10 veces más rápido de lo que cabría esperar si sólo tuviéramos en cuenta la difusión. Ha de darse, pues, un proceso más activo que intensifica y altera el campo dinámicamente. Este mecanismo lo constituye la "congelación del flujo", en cuya virtud las líneas de fuerza del campo magnético son arrastradas con la corriente fluida del núcleo. Cuanto más se parezca el núcleo a un conductor perfecto de la electricidad, tanto más rápidamente quedarán atrapadas las líneas en él. Si nos atenemos a las observaciones del campo actual, el flujo congelado parece dominar las variaciones a corto plazo, es decir, las que se producen a lo largo de varios decenios.

El éxito de una teoría de la dinamo terrestre, y en particular del mecanis-

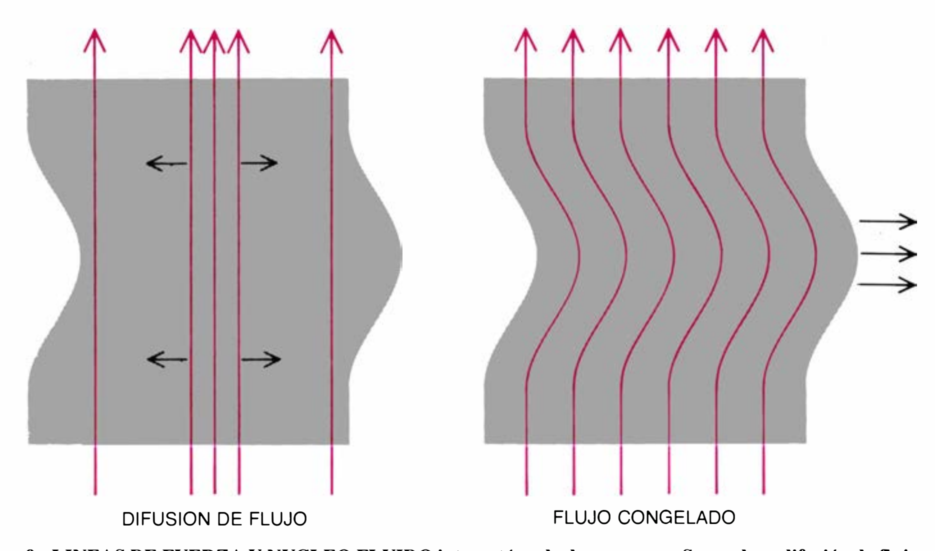


8. DESVIACION EN BUCLE realizada por el campo magnético terrestre hasta una posición a medio camino entre los dos estados de polaridad, registrada en sedimentos de 28.000 años de antigüedad en el lago Mono, California (*a*). ¿Pudo esta desviación representar un intento de la dinamo de invertir su polaridad? Los datos del volcán Liverpool, en Australia (*b*), inducen a pensar que las desviaciones podrían estar relacionadas con inversiones completas. Los datos, de lavas del Oligoceno de 34 millones de años de antigüedad, indican la existencia de tres avances (*líneas rojas y azules*) por parte del campo hasta alcanzar aproximadamente la misma orientación intermedia (*mancha azul*) antes de la inversión acabada con éxito (*línea verde*). Las lavas del monte Steens, Oregón (*c*), revelan que un campo recién invertido puede "rebotar" (*línea verde*) y regresar a una orientación intermedia. La inversión representada aquí se produjo en el Mioceno, hace unos 15 millones de años. Los datos del lago Mono se publican por cortesía de Joseph Liddicoat, de la Universidad de California en Santa Cruz.

mo de inversión de la polaridad, depende en parte de que logre determinar la importancia relativa de estos dos procesos. De nuevo, los datos paleomagnéticos están empezando a crear un cuadro bastante sólido. La dinamo terrestre en inversión parece desempeñar a veces un papel muy activo y comportarse otras bastante pasivamente. Se cree que, durante los rápidos saltos de dirección, las aceleraciones insólitamente elevadas de la corriente fluida provocan que el flujo congelado adopte configuraciones continuamente cambiantes. En las épocas en que el campo permanece tranquilo, como en los periodos de espera, la difusión del flujo debe intervenir de un modo más destacado.

Aunque el motivo exacto sigue siendo desconocido, la gravedad y la rotación terrestre, que interactúan con las diferencias de densidad que existen en el fluido dentro del núcleo, constituyen las fuerzas últimas que impulsan la dinamo y controlan esta dicotomía de procesos. El proceso de inversión podría desencadenarse cuando algo perturbara la configuración convectiva del fluido del núcleo, y con ella el flujo magnético. Phillip L. McFadden, de la Oficina de Recursos Minerales, Geología y Geofísica en Australia, y Ronald T. Merrill, de la Universidad de Washington, sugieren que el proceso causante guarda una íntima relación con la manera en que el núcleo externo libera su calor traspasándolo al manto. El intercambio de calor podría crear burbujas de materia calientes (ascendentes) o frías (descendentes) en las fronteras interna y externa del núcleo fluido, perturbando así la forma de la convección principal.

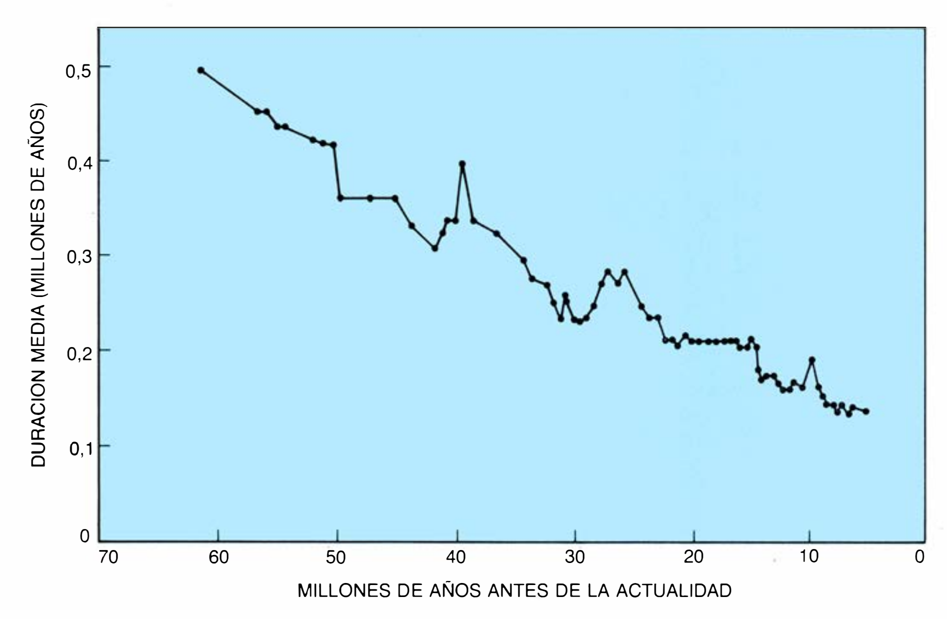
Entre las teorías más heterodoxas y controvertidas mencionaremos la "hipótesis del impacto de un asteroide", propuesta por Richard A. Muller y Donald E. Morris, del Laboratorio Lawrence de Berkeley. Su hipótesis comienza con el impacto de un asteroide u otro objeto extraterrestre de magnitud suficiente para levantar una gran nube de polvo y enviarlo a la atmósfera. El resultado es, así se presume, una especie de "invierno nuclear" que promueve el crecimiento de los casquetes polares de hielo, alterando bruscamente la distribución de agua en la superficie de la Tierra y, con ello, el momento de inercia de ésta. La aceleración angular del manto habría de aumentar para conservar el momento cinético, lo que daría lugar a rozamiento y turbulencia en la vecindad de la frontera núcleo-manto, iniciándose así la inversión del campo magnético.



9. LINEAS DE FUERZA Y NUCLEO FLUIDO interactúan de dos maneras. Se produce difusión de flujo cuando las líneas del campo (*rojo*) pasan de regiones de alta densidad de campo hacia regiones de baja densidad. Este proceso explica la atenuación del campo. El flujo congelado se produce cuando las líneas de fuerza son arrastradas por el núcleo fluido altamente conductor en su movimiento y crean campos locales.

¿Hasta qué punto dan cuenta estas dos hipótesis de observaciones tales como el aumento a largo plazo de la frecuencia de inversiones? En apoyo de su modelo, Morris y Muller arguyen que el gradual descenso de la temperatura media del océano posibilitaría el choque de asteroides cada vez menores (lo que ocurre con mayor frecuencia) que inducen el crecimiento de los casquetes y las inversiones. Pero las teorías que recurren a la intervención extraterrestre parecen menos convincentes que las teorías como la de McFadden y Merrill, que explican las características observadas de la dinamo terrestre apelando sólo al estado termodinámico del núcleo y sus efectos sobre el manto profundo.

La geofísica se encuentra hoy en una encrucijada histórica. Durante los últimos treinta años, los investigadores han peinado la Tierra en busca de los fantasmales rastros de antiguas inversiones del campo magnético, han puesto en relación indicios de puntos diferentes, han tratado de extraer la realidad a partir de un archivo poco menos que ideal y han elaborado pieza a pieza un cuadro del campo en inversión. Sus resultados constituyen ahora un reto para los teóricos que pretendan desarrollar modelos de la dinamo terrestre y así explicar el comportamiento observado. A medida que vayan saliendo a la luz más datos paleomagnéticos, éstos desempeñarán un papel decisivo en la criba de los modelos plausibles.



10. REDUCCION DE LA DURACION DEL INTERVALO MEDIO DE POLARIDAD, cuando el campo terrestre permanece en el estado normal o inverso; revela que las inversiones de polaridad han ido ocurriendo a un ritmo cada vez mayor. Un modelo cabal de la dinamo terrestre debería explicar esta tendencia.

Interacción de la radiación láser con los materiales

La interacción que se produce entre la radiación emitida por el láser y el material sobre el que actúa permite el estudio de las propiedades electrónicas, la formación de nuevos compuestos metaestables o la degradación del material

Carmen Ortíz

El láser es una fuente luminosa que se distingue por propiedades únicas: coherencia (correlación de fase entre dos puntos en el espacio o en el tiempo), monocromaticidad (a diferencia de la luz blanca, la radiación láser tiene un solo color o longitud de onda), direccionalidad (emisión de la luz en una dirección predeterminada) y alta potencia (para una radiación en régimen continuo, se alcanzan valores de varios kilowatt y, en régimen de pulsos, de hasta varios megawatt). Al irradiar un material sólido con este tipo de luz se producen unas condiciones experimentales excepcionales debido a las características expuestas. Ello explica su empleo en la espectroscopía de alta resolución, entre otras técnicas analíticas, y su aplicación como tratamiento térmico de alta potencia en microáreas (verbigracia, en la formación de contactos óhmicos).

Tenemos, por un lado, el material sobre el que incide el láser; pensemos en una oblea de silicio, por ejemplo. Por otro, la luz o radiación electromagnética del láser. El tipo de interacción entre el material y la radiación láser depende de las propiedades de ambos. Del láser importa tener en cuenta su longitud de onda, que afecta directamente al proceso óptico de absorción y que cubre una amplia gama que varía desde 193 nanómetros (con el láser del excímero) hasta 10,6 micrometros (láser de dióxido de carbono); conviene considerar también su potencia, asimismo variable, desde miliwatts en un láser de helio-neón hasta megawatts en el pulso de un láser de dióxido de carbono; por último interesa el tiempo de interacción, que oscila desde un régimen continuo hasta pulsos muy cortos, del orden de femtosegundos (10^{-15} segundos). Eso por lo que concierne a las características principales del láser. Por lo que respecta a las del material que interviene en la interacción, podríamos dividirlas en dos tipos: ópticas y térmicas. Opticas son la absorbancia (que simbolizaremos por A) y la reflectancia (que representaremos por R); ambas son función de la longitud de onda de la luz. Características térmicas de los materiales son la conductividad térmica (K, que es función de la temperatura que alcanza el material) y el calor específico por unidad de masa (c_v).

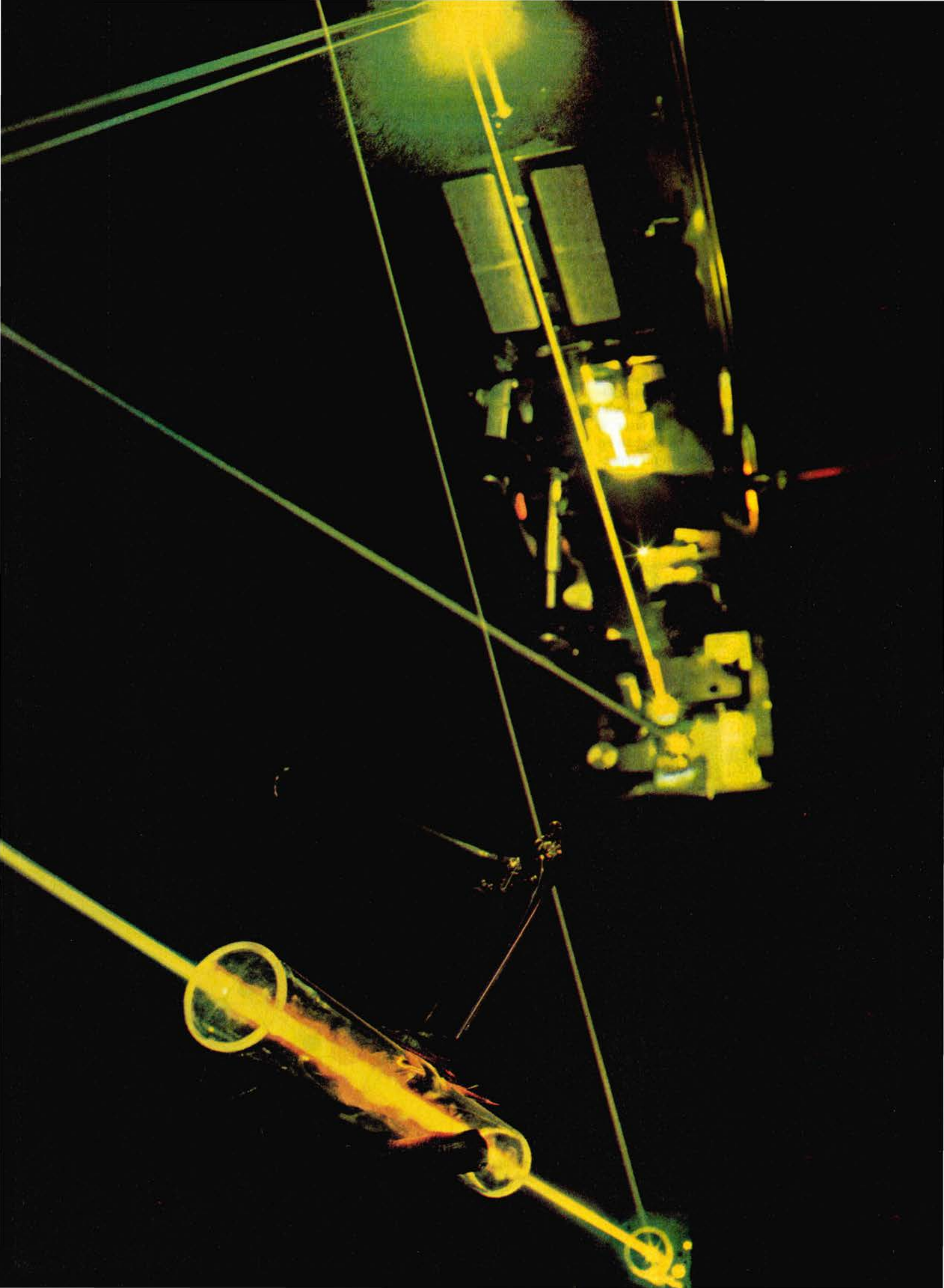
No debe perderse de vista que la interacción entre material y láser se hace exclusivamente entre los electrones del material y los fotones del láser; los núcleos de los átomos del material son demasiado pesados para responder a las altas frecuencias de los fotones, del orden de 10^{13} hertz. El acoplamiento de la radiación tiene lugar con la absorción de los fotones que transfieren su energía a los electrones, lo que provoca que éstos aumenten su nivel de energía ("se exciten"). Ahora bien, los electrones tenderán a volver a su nivel de equilibrio, para lo cual cederán el exceso de energía a la red cristalina. El efecto final del proceso es un aumento de energía calorífica en el material.

Si el material de interacción es metálico, el número de electrones libres es mayor que si se trata de un material semiconductor. Quiere decir ello, pues, que el acoplamiento dependerá de la clase de material.

En general, en la interacción del láser con el material se pueden considerar tres regímenes. Primero, si la fluencia del láser es baja, los fotones absorbidos inducen en la red cristalina procesos de tipo óptico y un ligero aumento de temperatura que puede llegar a modificar dicha estructura cristalina del material. (Por fluencia del láser se entiende la energía irradiada por unidad de área.) En segundo lugar, si se aumenta la fluencia absorbida hasta el punto de que el material funda, la estructura de éste sufre cambios tan pronunciados que pueden detectarse por experimentos en tiempo real. De esta manera, Michael Thompson y sus colegas, de la Universidad de Cornell, demostraron, midiendo la reflectancia y la conductancia durante la irradiación con el láser, que el silicio amorfo funde a 200 grados menos que el mismo material en estado cristalino. Por último, si se aumenta todavía más la fluencia, entonces se produce un daño irreversible en el material. Estudiemos los tres regímenes, uno por uno.

Empezaremos por examinar el primer régimen. Dentro de éste, cuando predominan los procesos de carácter óptico sobre los procesos, siempre presentes no obstante, de tipo térmico. La espectroscopía por láser constituye uno de los campos científicos con mayor resolución para el estudio de los procesos ópticos. Uno de sus objetivos es el estudio de los defectos que presentan los sólidos. Estos defectos pueden ser intrínsecos a la red cristalina del material o extrínsecos a ella, producidos en este segundo caso a menudo por la irradiación con partículas de alta energía, tales como neutrones o rayos X. Uno de los principales defectos que se forman en la red cristalina son las "vacantes", que, como indica su nombre, aluden a la ausencia de un átomo. Desde el pun-

1. EXPERIMENTO para estudiar la saturación del mecanismo de absorción óptica en una célula que contiene vapor de iodo. El láser empleado es un láser de colorante, de frecuencia estabilizada, con la configuración de alta eficiencia llamada "en anillo", donde el medio activo es rodamina 6G. Este láser se bombardea con otro láser de argón (línea 5145 Å). El experimento fue ideado por M. Levenson y F. Schellenberg.

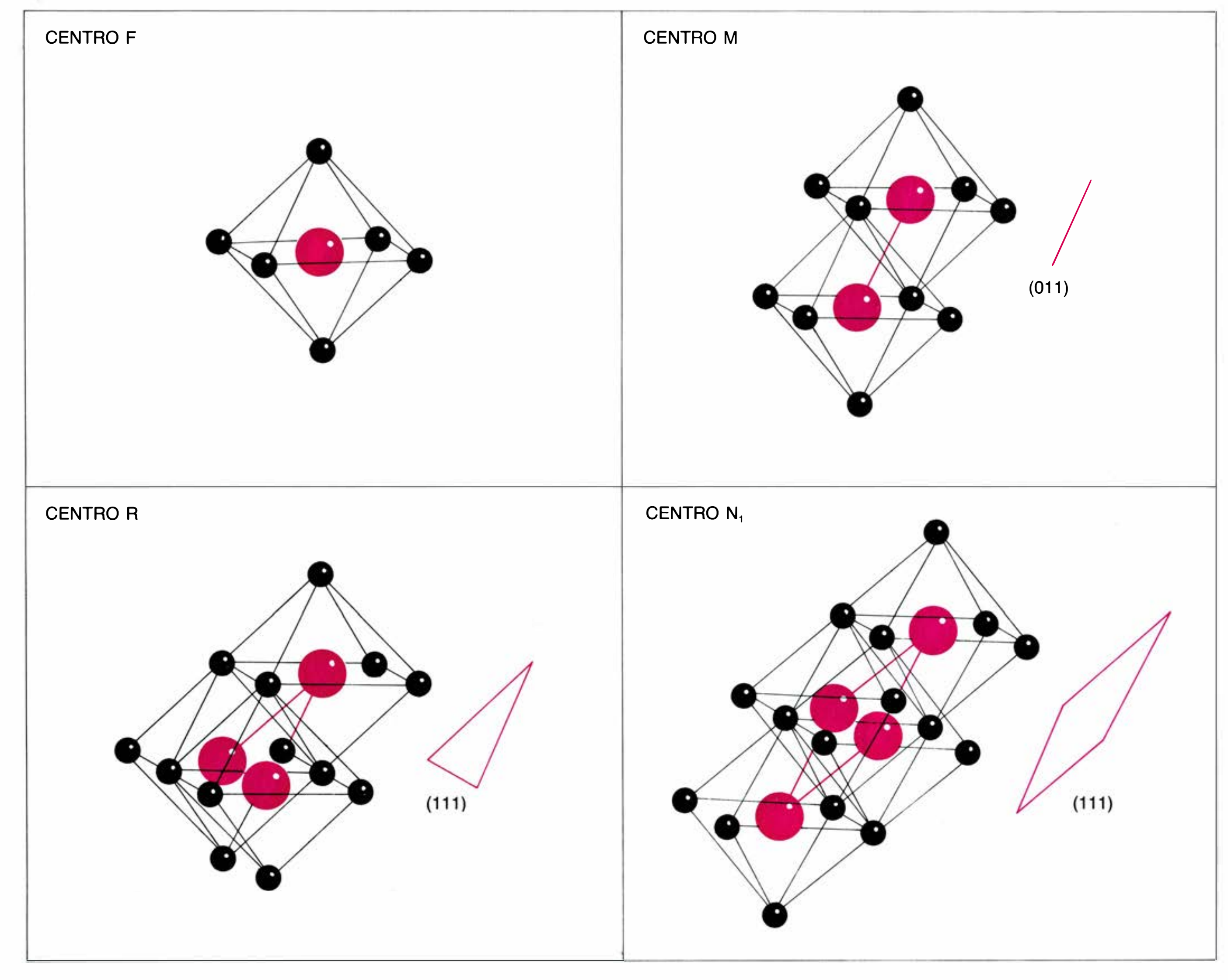


to de vista electrónico, este defecto introduce un nuevo nivel de energía que puede ocuparlo un electrón; si tal ocurre, decimos que se ha formado un centro *F*. Esa denominación deriva de la palabra alemana que designa color, *Farbe*, pues ese defecto, cuando se produce con cierta densidad, colorea el cristal y presenta espectros de absorción y emisión determinados por una longitud de onda o "color" específico.

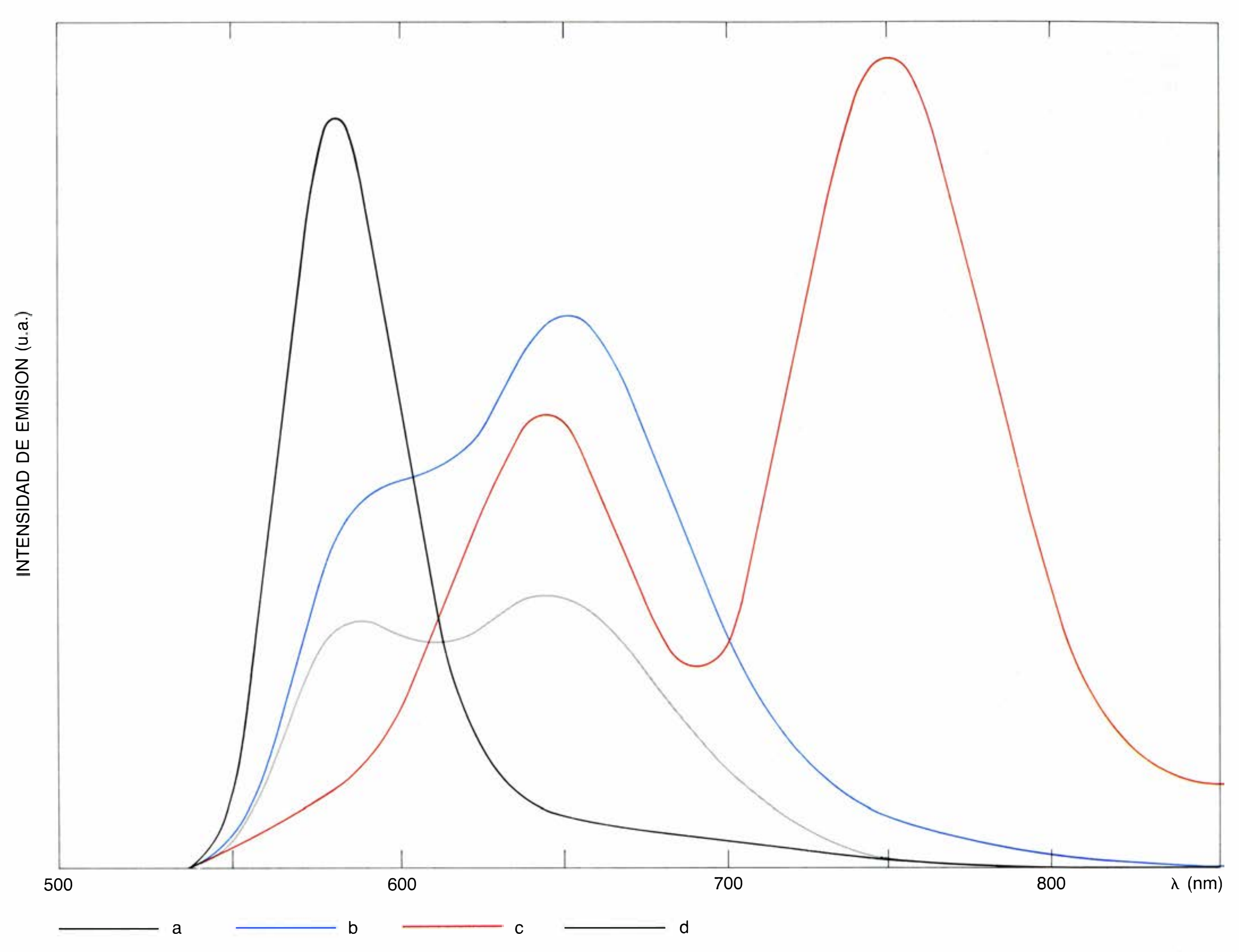
Cuando esos centros *F* constituyen aglomerados, se producirán defectos más complejos. Así, dos defectos *F* interaccionan en la dirección (001) del material y su aglomerado recibe el nombre de defecto *M*. De la misma manera, tres defectos *F* dan lugar al llamado defecto *R*, que se forma en la dirección (111). Al iluminar el material con cierta longitud de onda del láser, si hay defectos en la red que absorban en esta frecuencia, se observará un espectro de emisión compuesto por las emisiones específicas de cada defecto presente. Este método, pues, es fundamental para estudiar el distinto tipo de lesión o daño que sufre un material, tras habérsele irradiado con diferentes fuentes: neutrones, electrones, rayos X o bien iones. Se puede así poner de manifiesto que los iones, por citar un ejemplo, producen un tipo de defecto único porque el daño que provocan induce en el material una distribución de vacantes muy particular, en forma de cascadas.

La espectroscopía por láser no sólo sirve para descubrir los defectos de una red cristalina, sino que puede aplicarse también a la información en memorias ópticas criogénicas, campo en el que la autora ha venido trabajando en el laboratorio de IBM en California. La capacidad de almacenamiento de una memoria óptica está limitada, por la difracción de la luz, a un máximo de 100 millones de bits por centímetro cuadrado. Nuestra aplicación permite una capacidad de almacenamiento ingente: 100.000 millones de bits por centímetro cuadrado.

En una memoria óptica normal se emplea el láser como fuente térmica que, una vez enfocada en el punto de coordenadas *x, y* del material, cambia la estructura de éste y consecuentemente sus propiedades ópticas. La cabeza lectora tiene un segundo láser de muy baja potencia que es capaz de detectar las variaciones de reflexión óptica inducidas por la irradiación con el láser. En una memoria óptica criofísica, añadimos una nueva coordenada al proceso de almacenamiento óptico de la información: el color específico o longitud de onda. El material que estudiamos tiene defectos activos que presentan absorción óptica a determinadas longitudes de onda. Así, en cada punto *x, y* del material, una vez que es-



2. MODELOS DE CENTROS DE COLOR. Se trata de los defectos llamados "vacantes", que están inducidos por la ausencia de uno o más átomos. El centro *F* es el defecto más sencillo: una vacante ocupada por un electrón. El centro *M* constituye un aglomerado de dos centros *F*; por su parte, los centros *R* y *N* se hallan compuestos por tres y cuatro centros *F* respectivamente. La aglomeración de centros tiene lugar en direcciones características de la red cristalina.



3. ESPECTRO DE EMISION OPTICA a 77 grados Kelvin de un monocristal de fluoruro de sodio dopado con cobre, después de haberlo irradiado con neutrones (*a*), electrones (*b*), iones de hidrógeno (*c*) o rayos X (*d*). La longitud de onda de excitación es de 4880 angstrom. (Intensidad representada en ordenadas.)

tamos en la zona de absorción óptica, podemos almacenar nuevos bits con sólo variar la longitud de onda emitida por el láser. Veamos este proceso con más detalle.

El material para estas memorias tiene una componente activa, formada por defectos estructurales del material y embebida en una matriz cristalina neutra. Estos defectos tienen electrones que son resonantes con la longitud de onda del láser. En el caso irreal de que la matriz gozara de perfección cristalográfica, todos los defectos fotoactivos absorberían la misma longitud de onda del láser; llamémosla W_H (donde H significaría homogénea). El espectro de absorción correspondiente sería una línea espectral muy estrecha, cuya anchura vendría determinada por la vida media u otros procesos de relajación del estado electrónico excitado. En la realidad, los defectos activos tienen distribuciones ligeramente no homogéneas. Su espectro de absorción está compuesto por la convolución de muchas líneas homogéneas y su anchura espectral se denomina W_I (donde I significa inhomogénea). Esa convolución de líneas es la que nos permite crear una memoria, ya que nuestro experimento se funda en excitar un paquete espectral individual definido por W_H. Notemos que en nuestro ensayo W_H es de 1000 a 10.000 veces más estrecho que W_I. Eso significa que podemos excitar separadamente de 1000 a 10.000 paquetes espectrales con sólo variar ligeramente la frecuencia del láser. Con otras palabras, podemos hacer de 1000 a 10.000 quemados espectrales para cada punto *x, y* del material. Cada quemado espectral se traduce en un bit de memoria. Como es lógico, esa memoria gigantesca impone restricciones experimentales. Para llevar a cabo el experimento necesitamos el tipo de láser llamado de colorante, que tiene amplio rango de sintonización de frecuencia con gran estabilización. Esta característica permite seleccionar la excitación de paquetes espectrales estrechos. El experimento tiene que realizarse a temperaturas criogénicas de 2 grados kelvin para trabajar en las líneas espectrales llamadas de fonón cero, es decir, de transiciones "puras", donde no intervienen las vibraciones térmicas de la red. El material tiene que hallarse inmerso en helio líquido.

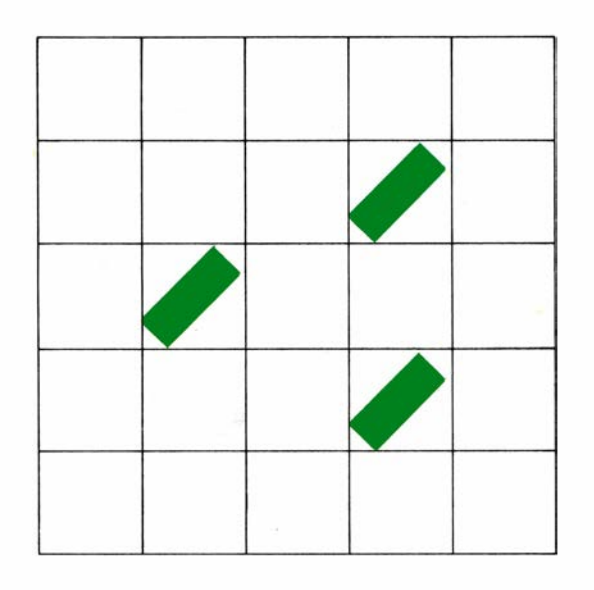
Otro de los requisitos necesarios para este tipo de memorias es que el espesor de la capa activa sea menor que la profundidad de foco del sistema óptico que se utiliza. Si el material es muy espeso, el diámetro de la radiación láser se ensancha al atravesarlo e induce una disminución de la densidad posible de almacenamiento. Esto obliga a buscar geometrías en lámina delgada para el material fotorreactivo. Uno de los métodos que empleamos para obtener defectos resonantes con el láser en matriz de haluros alcalinos es la implantación con iones de relativa baja energía (acelerados a 280 kiloelectronvolt), cuya penetración en el ma-

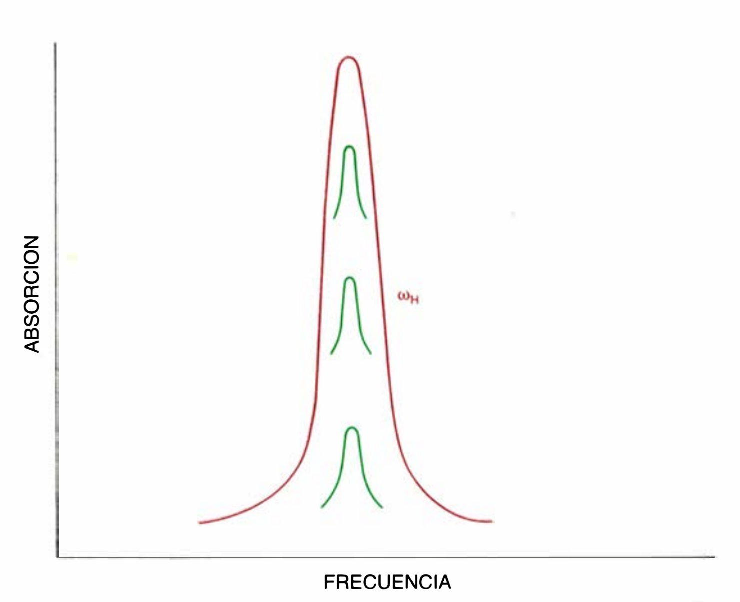
terial calculamos por el método de Monte Carlo; dicha penetración es inferior a las dos micras, con lo que limitamos a este espesor la componente fotorreactiva. Otra manera de obtener la misma configuración consiste en depositar el material en forma de lámina delgada policristalina e irradiarlo luego con rayos X para formar los defectos examinados.

Por último, mencionaremos otro método muy eficiente para obtener altas densidades de este tipo de defectos estructurales en configuraciones planas. Se trata de la irradiación con electrones a una energía de 25 kiloelectronvolt. En este caso hemos logrado formar los defectos sensibles a la radiación láser que son centros de color de tipo *M* (aglomerado de dos centros *F*) en un monocristal de fluoruro de sodio irradiado con electrones en un cámara de litografía. Este método ofrece la gran ventaja tecnológica de que, al estar automatizado el movimiento del haz de electrones, podemos obtener la distribución de los defectos, en cualquier circuito que definamos en el ordenador. Con láseres de colorante hemos logrado quemados ópticos a temperaturas criofísicas en cristales tratados con los distintos métodos aquí esbozados.

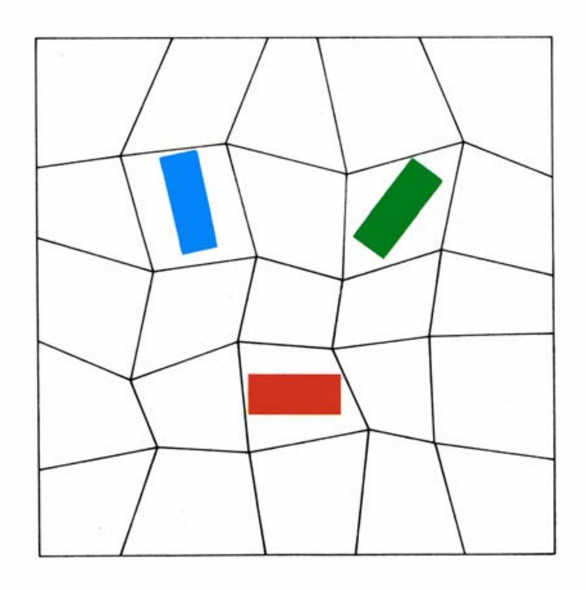
Desde el punto de vista tecnológico, se prefiere el empleo de láseres de dimensiones menores, que son los de estado sólido de arseniuro de galio y aluminio. Su mayor ventaja reside en su integración potencial en los circuitos optoelectrónicos del mañana y, sobre todo, en comunicaciones por fibra óptica. Presentan el inconveniente de que irradian en el infrarrojo no visible del espectro y, además, la calidad óptica del haz es inferior a la de los láseres de iones. En nuestra investigación de memorias criogénicas hemos logrado obtener el quemado de agujeros espectrales con este tipo de láseres en mono-

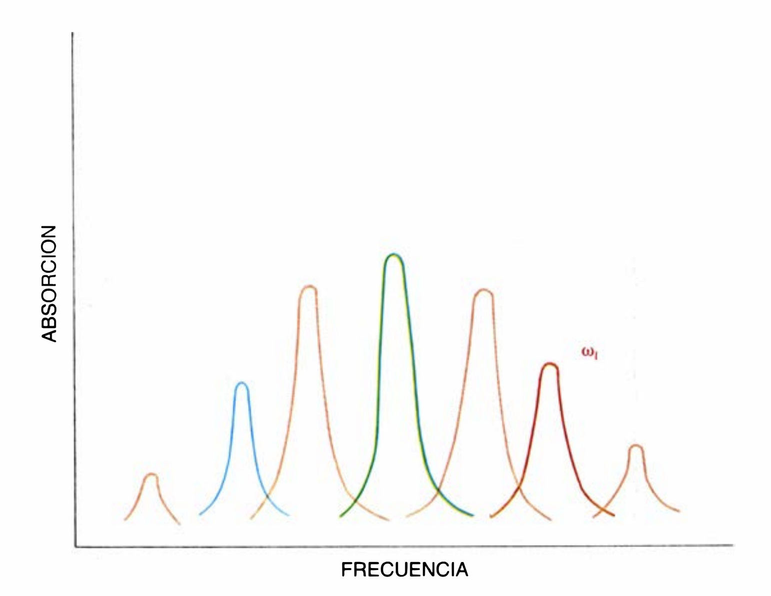
CRISTAL PERFECTO



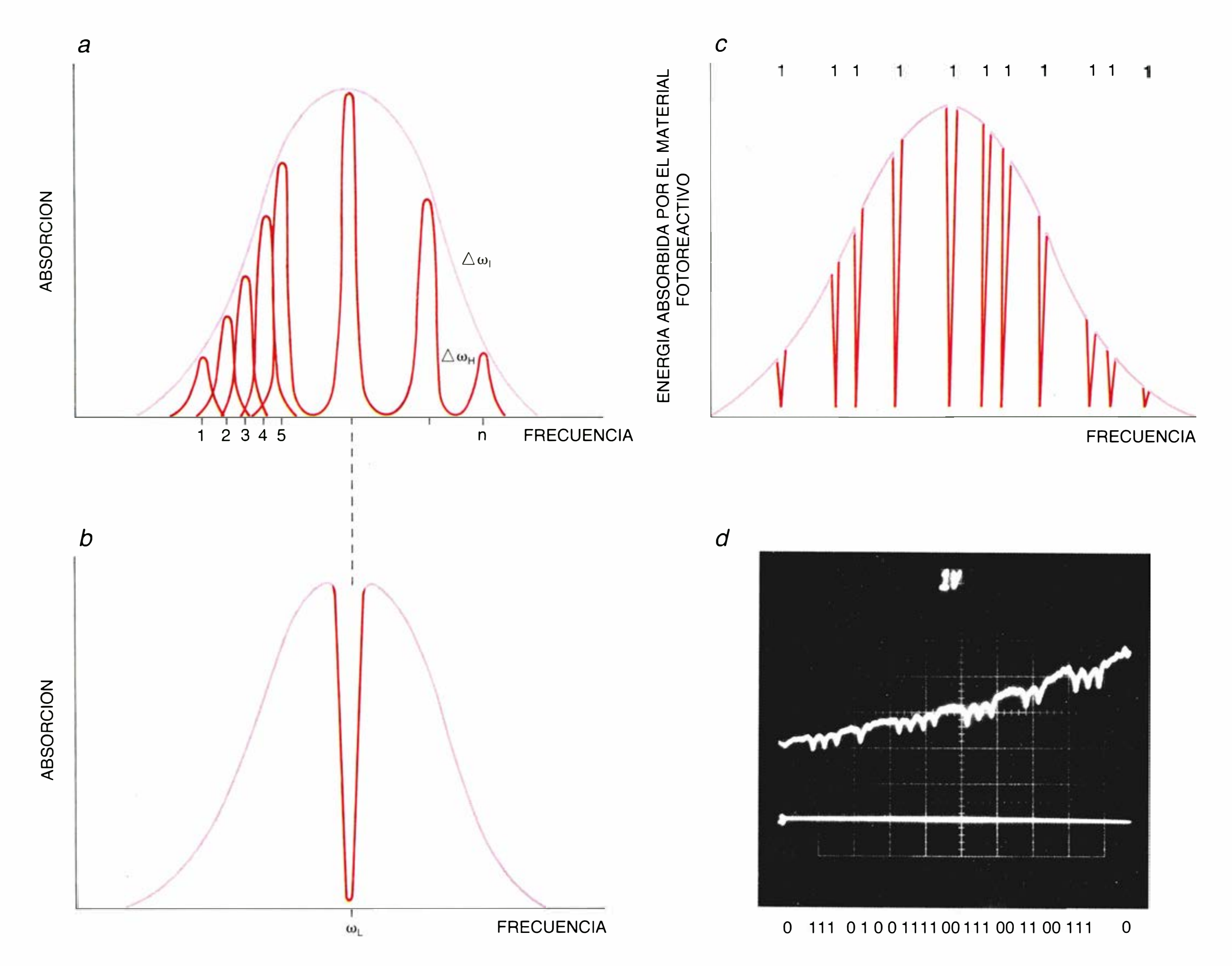


CRISTAL REAL





4. ESQUEMA EN UN CRISTAL PERFECTO de las moléculas activas para la memoria óptica, así como la correspondiente absorción óptica que muestra la coincidencia de todas las líneas de absorción (*ambas ilustraciones de arriba*). La curva W_H es la anchura de la línea homogénea o natural determinada por la vida media u otros procesos de relajación del estado electrónico excitado. En el esquema del cristal real o imperfecto (*dibujos inferiores*), las moléculas están desordenadas y la absorción óptica correspondiente está formada por diferentes líneas cuya convolución forma la denominada banda inhomogénea (W_I).



5. ALMACENAMIENTO DE INFORMACION en un cristal real, donde se indica la absorción inhomogénea W_I y la superposición de las líneas homogéneas W_H (*a*). El subgrupo de moléculas que absorbe la frecuencia W_L ha sido excitado por la radiación láser (*b*). En el apartado (*c*) se ilustra un proceso de multiquemado con notación de almacenamiento de información, y, en (*d*), un quemado por láser en la línea espectral de 6070 angstrom del fluoruro de sodio.

cristales y en láminas policristalinas de 20 micras de espesor.

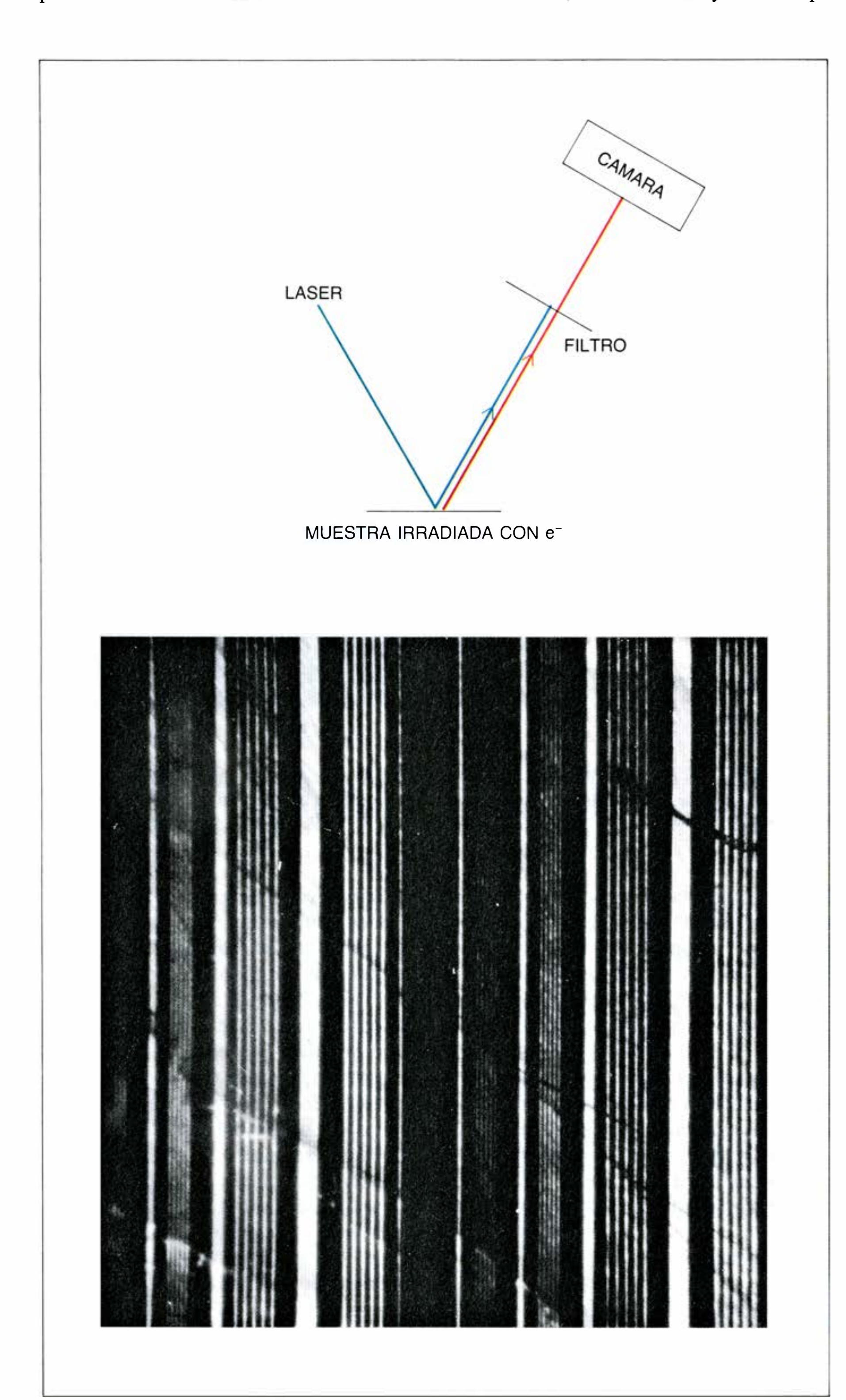
Dentro de este primer régimen de baja fluencia del láser, si aumentamos ésta, los procesos térmicos predominan sobre los ópticos e inducen experimentos de ciencias de materiales muy interesantes. Por un lado están los relacionados con la cristalización de materiales amorfos, incluyendo el mecanismo de epitaxia (así se llama el crecimiento cristalino con orientación preferente) en fase sólida de aquellos materiales que han sufrido una implantación de iones con algún elemento específico para cambiar sus propiedades electrónicas. El efecto secundario de este proceso es siempre un desorden parcial de la red cristalina, que puede mejorarse por irradiación con el láser, como J. M. Poate y W. L. Brown, de los laboratorios Bell, han demostrado. Por otro lado, al aumentar la temperatura de un compuesto podemos, sin llegar a fundir el material, inducir otra fase con distinta estructura reticular y diferentes propiedades físicas. Por ejemplo, si irradiamos una lámina delgada de espinela de estructura cúbica con un láser de argón, cuya longitud de onda es de 5145 angstrom, observamos una transformación en la fase alfa que tiene estructura hexagonal. Correlacionado con este cambio de estructura hay un cambio de propiedades magnéticas, puesto que la ferrita tiene un momento magnético M determinado y la fase alfa posee un momento nulo por ser antiferromagnética.

Continuemos con el régimen segundo, donde la fluencia del láser es suficiente para alcanzar la temperatura de fusión. En el ejemplo anterior, si seguimos aumentando la potencia del láser hasta 27 miliwatt para el mismo tiempo de irradiación (típicamente de unos 30 segundos), fundimos el material solidificándose posteriormente en grandes monocristales de la fase alfa.

Dentro de las condiciones experimentales, el empleo de pulsos cortos con el láser ha abierto un campo nuevo en el procesado de materiales por templado rápido, que compite con otros métodos mecánicos más clásicos, que dan regímenes de gradiente de enfriamiento del orden del millón de grados kelvin por segundo. Esa velocidad de enfriamiento puede superarse fácilmente al disminuir la duración del pulso de láser, pues cuanto menor sea el tiempo de irradiación mayor será el gradiente de temperatura entre la superficie y el resto del material.

Una de las principales características de este segundo régimen de trabajo es la alta difusión de los átomos en la red. Lo que da lugar a la reordenación de éstos. Dentro de los materiales estudiados en este régimen, los semiconductores son los más importantes por su

gran influencia en la técnica y la industria. Conviene advertir que, en estos materiales, la difusión térmica disminuye rápidamente al aumentar la temperatura, de manera que la conducción de calor procede con mayor lentitud en la superficie donde tiene lugar el acoplamiento de la radiación láser con el material. Se formará, pues, una capa de material fundido que se propagará desde la superficie y cuya velocidad se mide por el movimiento de la interfaz sólido-líquido. En el caso de semiconductores dopados específicamente para incorporar determinadas propiedades electrónicas, C. W. White y B. R. Appleton, del laboratorio de Oak Ridge, han demostrado que, según el valor de esta velocidad, se puede inducir la precipitación de los átomos del contaminante a la superficie, o, por el contrario, su distribución homogénea en la muestra, alcanzándose concentraciones de dopante mucho más altas que el límite de solubilidad. La importancia de este último resultado radica en el aumento del carácter *p* o bien *n* que los semiconductores presentan al ser dopados con impurezas predeterminadas.

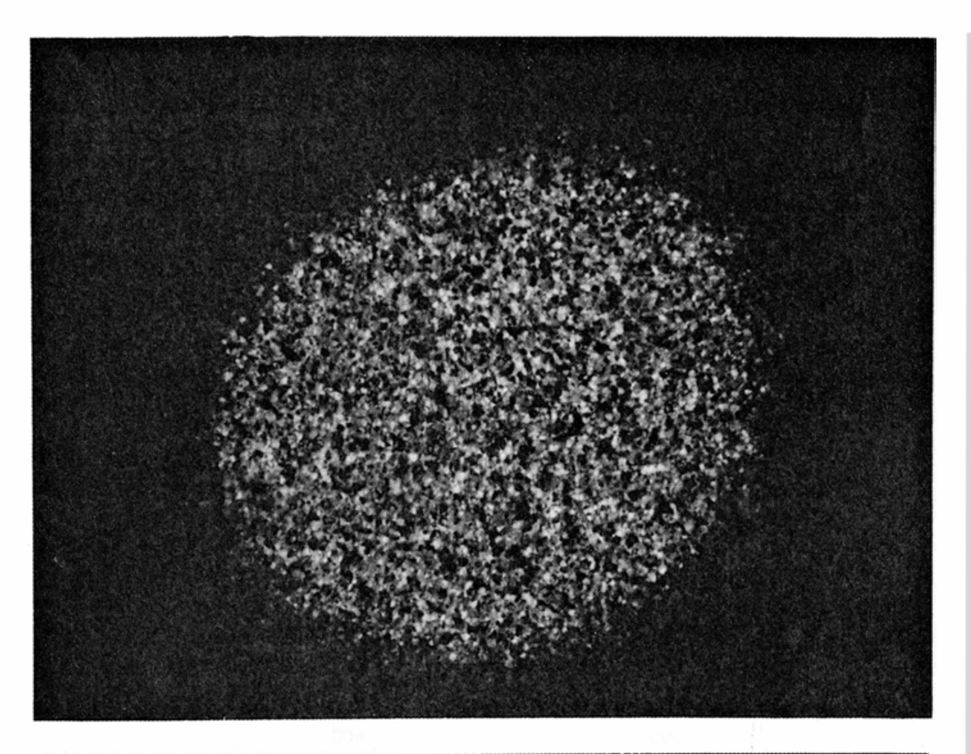


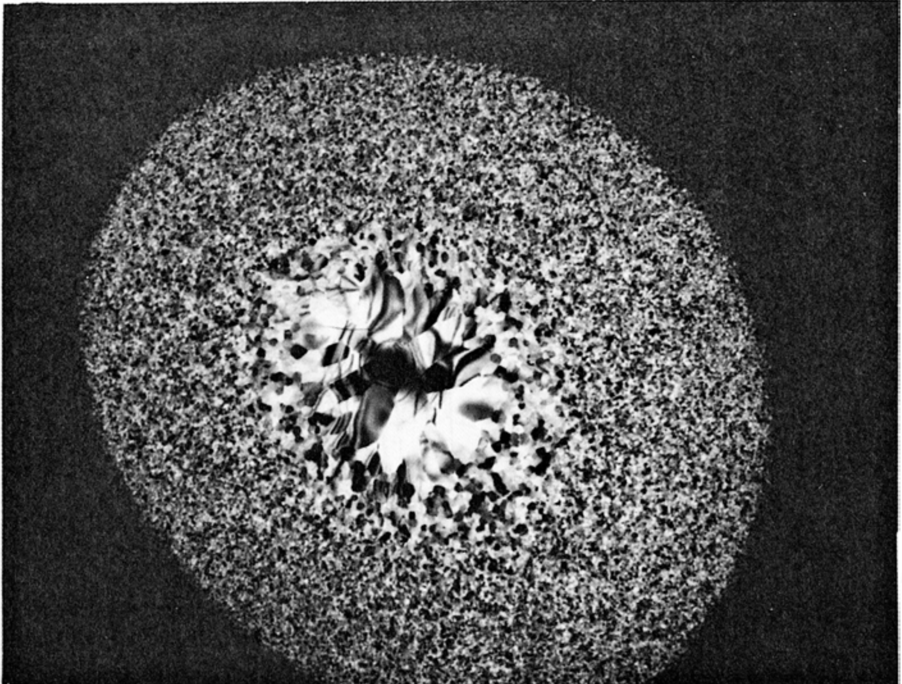
6. EMISION OPTICA de los centros de color de tipo *M* formados en un monocristal de fluoruro de sodio irradiado con electrones en una cámara de litografía donde un ordenador dirige el haz electrónico siguiendo el circuito de rastreo. Esta emisión ha sido inducida por la línea 5145 angstrom de un láser de argón.

Otro mecanismo muy estudiado ha sido el de epitaxia en fase líquida, donde la fusión permite un nuevo crecimiento del cristal con aumento del orden cristalino. Si el área fundida es mayor que la desordenada, se obtendrá un monocristal; si es menor, el material resultante será policristalino. (El monocristal compuesto por un solo cristal tienen la mayor perfección cristalina posible, ya que la ordenación de los átomos en la red cristalográfica no ofrece discontinuidades. En el caso del material policristalino, éste se halla compuesto por muchos cristales o granos cristalinos. En este segundo caso, la ordenación de los átomos sufre alteraciones en las fronteras de grano. El caso límite de desordenación de átomos está representado en los materiales llamados amorfos, cuyo ejemplo más conocido son los vidrios.)

En cuanto a la fusión de materiales metálicos, no hay que olvidar que su reflectividad es muy alta (más del 90 por ciento) para frecuencias menores que el valor crítico y su profundidad de absorción es pequeña (del orden de los 100 angstrom). Como los metales poseen una conductividad térmica elevada, se observarán fenómenos drásticos (tales como deformaciones plásticas y fracturas), pues se producen unos gradientes térmicos muy abruptos que, a su vez, pueden inducir tales tensiones que se supere el límite elástico.

Una aplicación importante es la obtención de nuevos materiales que pueden formarse por la fusión con láser. Se preparan en forma de una lámina con varias componentes o bien multiláminas delgadas de una componente, depositadas alternando los componentes y donde el espesor de cada capa es de unas pocas decenas de nanómetros, calculado de antemano según la composición relativa que se quiere obtener en el material final. Dentro de ese campo, los compuestos de silicio han despertado el natural interés por su implicación en la industria de semiconduc-





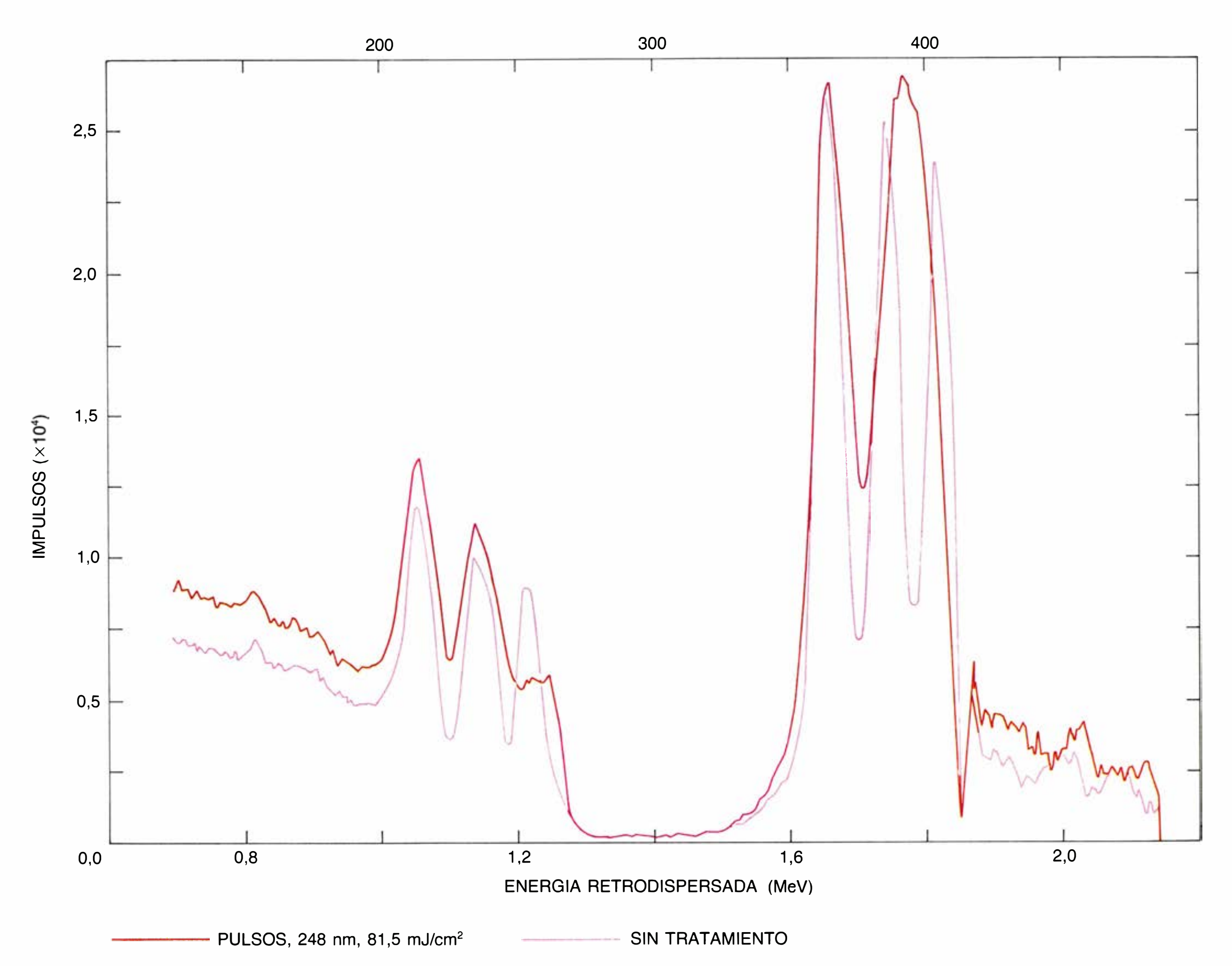
7. TRANSFORMACION DE LA FASE GAMMA Fe_2O_3 en la fase alfa Fe_2O_3 por irradiación con la línea de 4880 angstrom de un láser de argón durante 15 microsegundos. Se ilustra con una potencia de 13,5 miliwatt donde la transformación tiene lugar en fase sólida (*a*) o con una potencia de 27 miliwatt, suficiente para que el material funda y se solidifique, en la segunda fase (*b*), en grandes monocristales de la fase alfa.

tores. El mezclado de las capas empieza en la interfaz y suele tener lugar a la temperatura del punto eutéctico (punto de temperatura de fusión más baja en el diagrama de fases del sistema estudiado).

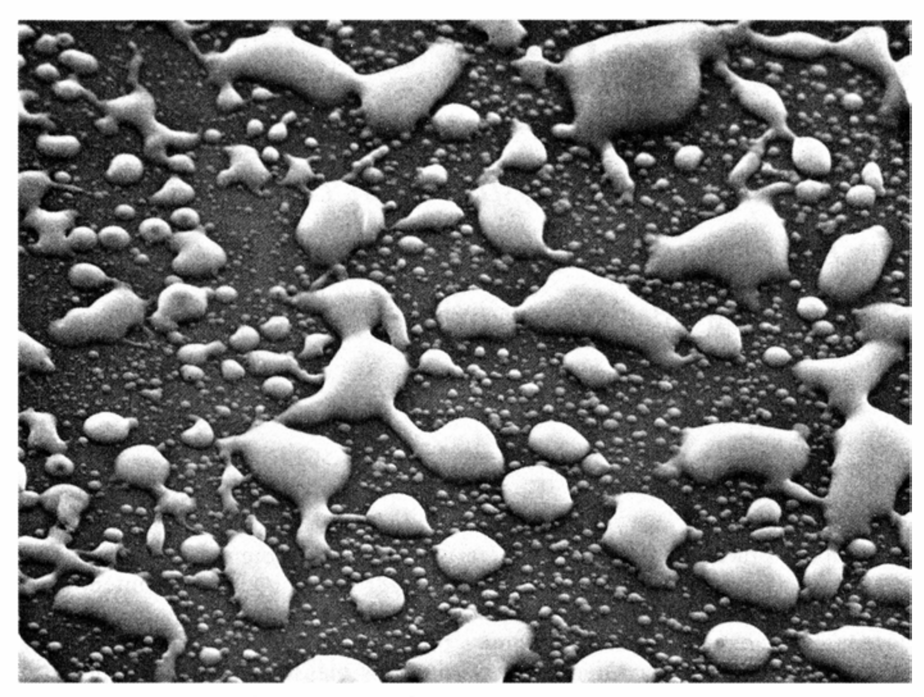
En nuestro caso hemos estudiado la formación por láser de nuevas estructuras metaestables en los sistemas constituidos por germanio y teluro y por germanio y aluminio, ya fuera en forma de aleación o de multicapas. Los parámetros experimentales que variábamos fueron la composición total, la potencia del láser, la duración y el número de pulsos. Para caracterizar los resultados nos servimos de las técnicas de retrodispersión de Rutherford, microscopía de transmisión, difracción de rayos X y de electrones, transmisión y reflexión ópticas.

¿Qué tipo de información concerniente a la estructura del material nos proporciona cada método? La retrodispersión de Rutherford consiste en irradiar el material con un haz de átomos ligeros, de helio por ejemplo, y muy acelerados (con una energía típica de 2, 4 megaelectronvolt). Estos átomos sufren una colisión elástica con los átomos del material y se ven retrodispersados con una energía menor que la inicial. Esa pérdida de energía es característica del átomo con quien ha sufrido la colisión. La mengua resulta tanto mayor cuanto menor sea la masa atómica del átomo bombardeado y mayor sea el espesor del material atravesado. Por consiguiente, si capturamos los átomos de helio retrodispersados, podremos deducir la composición del nuevo material en función de la distancia de la superficie. Así, pues, podremos conocer la concentración absoluta de los componentes y el grado de interdifusión que ha habido entre las diferentes capas después del tratamiento con láser. La estructura, o compuesto creado, se caracteriza por difracción electrónica y de rayos X, técnicas muy conocidas; los cambios de las propiedades electrónicas inducidas por el cambio estructural quedan reflejados en las propiedades ópticas. Sírvanos de punto de referencia una estructura metaestable, es decir, inexistente entre las fases termodinámicamente estables del sistema germanio y aluminio. (El equipo formado por F. Catalina, C. N. Afonso y la autora lograron obtener una fase metaestable al irradiar una lámina delgada de la aleación $Al_{59}Ge_{41}$ durante 50 microsegundos con 28 miliwatt utilizando la línea 4880 angstrom de un láser de argón. En el área fundida se pueden distinguir los cristales de germanio, que a menudo crecen en maclas, y la estructura de composición eutéctica, formada por láminas de aluminio intercaladas con la fase hexagonal metaestable.)

Al estudiar el mezclado de multicapas, podemos analizar la acción del láser con un ejemplo de la configuración de seis capas alternadas de germanio y aluminio en proporción de $Ge_{30}Al_{70}$ y con un espesor total de 2000 angstrom. Describamos el espectro de energía retrodispersada al incidir sobre la muestra iones de helio con energía de 2,3 megaelectronvolt: la superficie de la muestra corresponde a la coordenada de energía de ese mismo valor,



8. ESPECTRO DE ENERGIA RETRODISPERSADA de una muestra formada por seis capas alternantes de germanio y aluminio, antes y después de ser irradiada por ocho pulsos de un láser de excímero. La superficie de la muestra corresponde a la coordenada de energía de 2,3 megaelectronvolt. (En ordenadas, los impulsos.) A medida que va disminuyendo la energía, podemos reconocer cada componente, ya que los iones de irradiación son retrodispersados con tanta menor energía cuanto menor es la masa atómica del átomo bombardeado y mayor es el espesor del material atravesado. Los picos comprendidos entre 1,6 y 1,8 megaelectronvolt corresponden a las tres capas de germanio y los comprendidos entre 1,0 y 1,2 megaelectronvolt a las tres capas de aluminio.



9. IMAGEN DE MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO de la misma muestra de la figura 8, que ha sufrido un daño irreversible al haberse aumentado la fluencia del láser a 426 milijoule por cm^2.

puesto que no ha habido colisión. A medida que la energía va disminuyendo, podemos reconocer cada componente de la muestra. El espectro de la muestra antes de la radiación tendría tres picos entre 1,6 y 1,8 megaelectronvolt que corresponderían a las tres capas de germanio y otros tres correspondientes a las tres capas de aluminio (picos entre 1,0 y 1,2 megaelectronvolt). Esa misma muestra fue irradiada con ocho pulsos de 12 nanosegundos de un láser de excímero de 248 nanómetros de longitud de onda y una fluencia de 81,5 milijoule por centímetro cuadrado. El espectro, después del tratamiento con el láser, nos revelaría que las tres primeras capas (dos de germanio y una de aluminio) se han mezclado o interdifundido totalmente y la segunda de aluminio ha empezado a mezclarse, puesto que ha avanzado hacia la superficie, es decir, hacia el germanio. Por lo que a los dopantes se refiere, este método nos enseña que el contaminante (wolframio aquí) se ha desplazado hacia las interfaces entre las capas.

Vayamos con el tercer régimen de la interacción entre el láser y la estructura cristalina del material: cuando se eleva tanto la fluencia del láser que se altera irreversiblemente la superficie del material. Sea también aquí una muestra de multicapas, irradiada ahora con un pulso de 10^{-8} segundos y una fluencia de láser de 426 milijoule por centímetro cuadrado. En este caso se observa la evaporación de los átomos de la superficie y la muestra aparece erosionada. Conviene destacar que este dañado irreversible tiene importantes aplicaciones industriales. Al poder enfocar el haz del láser de alta potencia en microáreas sin entrar en contacto con el material, se puede cortar o soldar con gran versatilidad y una menor deformación mecánica. Para este régimen los láseres más empleados son, sobre todo, el de dióxido de carbono, cuya longitud de onda (10 micrometros) se halla en el infrarrojo no visible y permite trabajar en una amplia gama de potencias (de 10 a 10.000 watt). Para aplicaciones de menor potencia, el láser de estado sólido de neodimio y yag (de 10 a 40 watt) es muy empleado para soldar o procesar cavidades a bajos ángulos con respecto a la superficie, especialmente en materiales metálicos.

Hemos presentado en este artículo distintas facetas de la interacción entre la radiación láser y los materiales. La posibilidad de que mediante la variación de los regímenes de fluencia se produzcan transformaciones de fase y hasta nuevos materiales convierten a esta interacción en una herramienta poderosa para las nuevas ténicas de microelectrónica y optoelectrónica. Por no pertenecer al campo de trabajo de la autora, hemos dejado fuera una aplicación que quisiéramos mencionar por su interés en la vida diaria: la radiación láser dentro de la medicina moderna y, en particular, en el campo de la cirugía.

Aerogeles

Estos extraños sólidos, muy ligeros y porosos, están constituidos por más aire que gel. La ciencia ha empezado a estudiar las sorprendentes propiedades que su estructura les proporciona

Jochen Fricke

Cuando una medusa se extrae del mar y se deja secar al sol, el tejido restante es muy escaso. Igual que las medusas, la mayoría de las sustancias gelatinosas se contraen hasta ocupar un 10 por ciento de su volumen original cuando se secan al aire. A pesar de esa contracción, los geles secados al aire contienen todavía un 50 por ciento de espacio vacío. Los geles tienen tal cantidad de poros que su densidad es la mitad que la de otros sólidos análogos no porosos.

A comienzos de la década de los treinta, S. S. Kistler, de la Universidad de Stanford, descubrió un método para secar geles sin que se produjera una reducción de su volumen. Extrayendo el fluido de un gel húmedo bajo presión y a temperatura elevada, obtuvo unos materiales extraordinariamente ligeros con una porosidad hasta del 98 por ciento. Kistler llamó aerogeles a estos sólidos. Los primeros geles que produjo eran bloques traslúcidos de sílice, el componente principal del vidrio ordinario. Más tarde, Kistler consiguió aerogeles de alúmina, tungsteno, óxidos de hierro y estaño, tartrato de níquel, celulosa, gelatina, clara de huevo y caucho. No encontró ninguna razón para que esta lista no pudiera aumentar indefinidamente.

Treinta años más tarde, un grupo francés de investigación demostró que los aerogeles podían utilizarse para fabricar componentes de ciertos detectores de partículas utilizados en experimentos de física de altas energías. El equipo galo desarrolló también un nuevo método de fabricación de geles que conseguía sus objetivos en un tiempo de horas, en vez de semanas. Desde entonces, los aerogeles han sido objeto de una atención restringida, aunque creciente, por parte de la comunidad científica, cuyo interés está motivado por las propiedades singulares de estos curiosos materiales y por sus posibles aplicaciones prácticas.

Tal como Kistler había señalado, la conductividad térmica de los bloques de aerogel es unas 100 veces menor que la de los vidrios de sílice densos. La combinación de esta excelente propiedad aislante y su elevada transparencia sugiere su posible aplicación como elementos superaislantes en sistemas de ventanas o como pantallas para captar energía solar en colectores pasivos. Por otra parte, el trabajo reciente llevado a cabo en el laboratorio del autor, en la Universidad de Würzburg, ha puesto de manifiesto que el sonido se propaga a través de los aerogeles con una velocidad todavía menor de lo que lo hace a través del aire. Esta propiedad permitiría aumentar notablemente el rendimiento de los dispositivos emisores de ondas ultrasónicas cuya función consiste en medir distancias, como en el caso de los sistemas de focalización automática de que disponen algunas cámaras fotográficas.

La mayoría de las propiedades acústicas y mecánicas de los aerogeles tienen que ver con la peculiar estructura de estos materiales. Estamos investigando cómo modificarla a fin de mejorar el comportamiento de los aerogeles. Vale, pues, la pena dedicarle algunas líneas al proceso de fabricación.

Los aerogeles fabricados por Kistler partían de una solución de silicato de sodio, llamada vidrio de agua. Mezclada ésta con ácido clorhídrico, se gelatinizaba al cabo de 24 horas. Kistler lavaba con agua el ácido contenido en el gel, preparando un acuagel y, a continuación, sumergía este cuerpo en alcohol para obtener un "alcogel".

Kistler sabía que, en cuanto el líquido empieza a evaporarse de un gel, la tensión superficial crea meniscos cóncavos en los poros de éste. Un menisco es el contorno con forma de luna en cuarto creciente que se forma sobre la superficie de un líquido contenido en una columna (en un tubo de ensayo, por ejemplo). Si la evaporación continúa, los meniscos retroceden hacia el interior del cuerpo del gel y las fuerzas de compresión que actúan a lo largo de su perímetro producen una contracción. La tensión superficial acaba por producir el colapso del cuerpo gelatinoso, lo mismo que sucedía con las medusas de la playa [*véase la figura 2*].

Para impedir la acción de la tensión superficial, Kistler procedió a desecar el gel en una autoclave, o cámara a presión. Cuando la temperatura y la presión de esta cámara aumentan hasta superar cierto punto crítico, el líquido se transforma en un fluido "supercrítico" en el que cada molécula se mueve con libertad y cesan las tensiones superficiales. Sin tensión superficial, los meniscos no se forman. El fluido se extrae lentamente del autoclave, dejando en su interior el gel. Por último, se procede a rebajar la temperatura en el autoclave hasta alcanzar el valor de ambiente y se extrae el aerogel.

Los parámetros críticos que controlan este proceso de secado dependen del líquido utilizado. Por ejemplo, un gel humedecido con metanol requiere unas temperaturas del orden de 240 grados Celsius (el agua hierve a 100 grados) y unas presiones del orden de 81 bar (comparables a la presión que ejerce una columna de unos 76 metros de agua). El gel no experimenta ninguna fuerza de compresión y, por tanto, mantiene su tamaño y forma originales. La densidad del gel de sílice que Kistler preparó variaba entre 30 y 300 kilogramos por metro cúbico, correspondiendo a porosidades entre el 86 y el 98 por ciento.

Aunque Kistler tuvo éxito en el se-

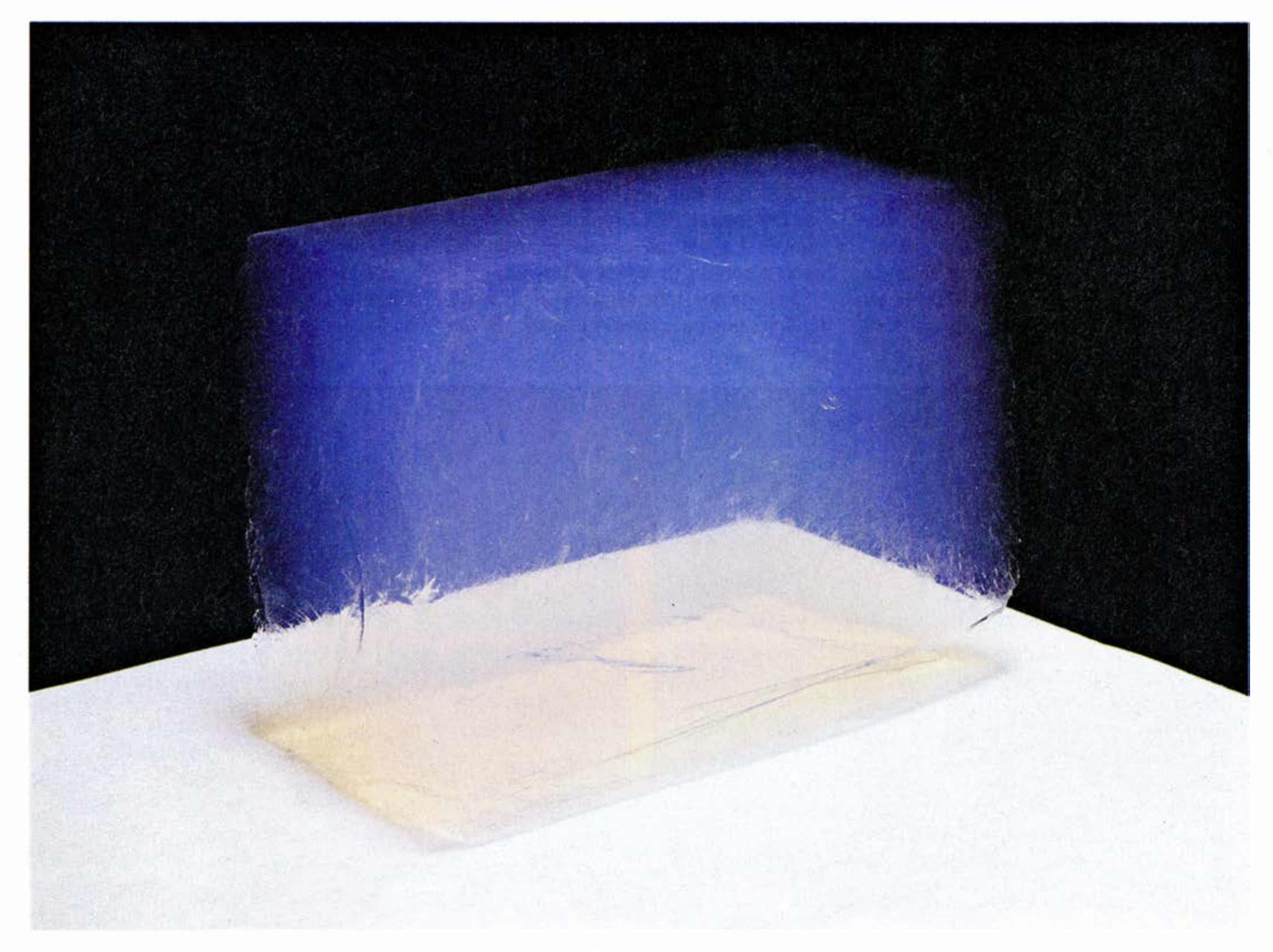
cado de geles sin que se produjera su contracción, siguió un método de preparación muy lento. En particular, el lavado del acuagel y el cambio posterior del disolvente por alcohol son procesos muy laboriosos. Sin embargo, la utilización del alcohol es necesaria porque el agua disolvería la estructura del gel a temperaturas elevadas. Cuando, a principios de los años sesenta, Stanislas J. Teichner, junto con uno de sus alumnos de la Universidad de Lyons, intentaron reproducir los resultados de Kistler, necesitaron varias semanas para preparar tan sólo dos muestras de aerogel.

El estudiante, cuya tesis versaba sobre la investigación de aerogeles, estaba totalmente desanimado ante la perspectiva de tener que invertir varios años en la preparación de los materiales que iba a necesitar y acabó por padecer una crisis nerviosa. Poco después de su recuperación, puso a punto un nuevo método de preparación de geles que sólo necesitaba un día. La técnica introducida por estos investigadores es la que suele emplearse en la actualidad.

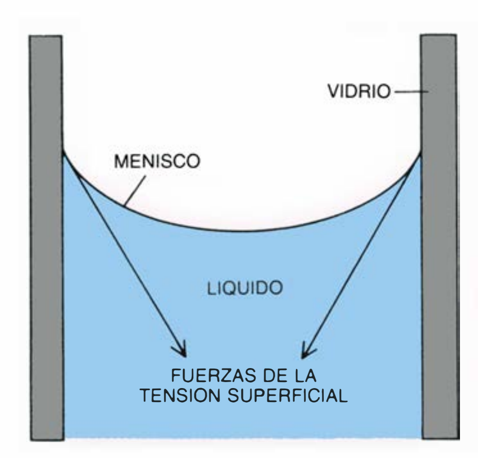
Para preparar un aerogel de sílice según el método de Teichner, se mezcla con agua un producto químico líquido e incoloro: tetrametoxilano (TMOS); cuando se añade un catalizador ácido o base, se obtiene ácido silícico y metanol. Las moléculas del ácido silícico empiezan a unirse entre sí y forman agregados microscópicos. A su vez, estos agregados se unen para formar estructuras mayores hasta acabar por constituir un gel coherente [*véase la figura 4*]. La estructura y la densidad de los aerogeles resultantes dependen del valor del *p*H, la temperatura y la concentración de los ingredientes utilizados en la síntesis, que se conoce con el nombre de proceso sol-gel.

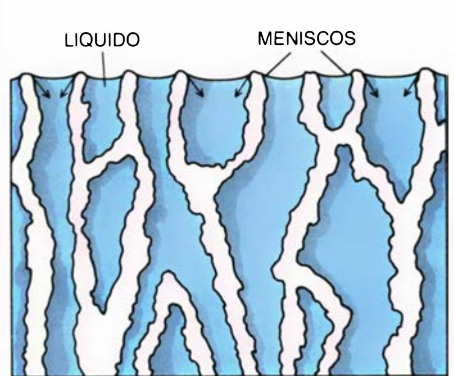
Se han estudiado otros métodos de síntesis de aerogeles: un grupo de investigación de la Universidad de California en Berkeley produce piezas de aerogel a partir de tetraetoxilano (TEOS), en vez del TMOS, que es venenoso. El grupo de Berkeley, que está dirigido por Arlon J. Hunt, emplea dióxido de carbono en sustitución del alcohol, componente habitual de la fase fluida. El dióxido de carbono no es explosivo y sólo necesita calentarse a unos 31 grados centígrados durante la fase de secado. Sin embargo, este método es mucho más lento que la técnica francesa, debido a que el canje entre el alcohol y el dióxido de carbono es muy lento.

La empresa B.A.S.F. de Ludwigshafen, en la República Federal Alemana, fabrica aerogeles en forma de granulado, en vez de bloques. Este proceso tiene lugar dispersando un ácido y una solución de vidrio de agua en un matraz, donde los granos se lavan y se secan por último en condiciones supercríticas. Los diámetros de los granos resultantes son del orden de algunos milímetros y las densidades llegan a alcanzar los 200 kilogramos por metro cúbico. La fabricación de aerogeles



1. ESTE FRAGMENTO DE AEROGEL es translúcido. Sobre un fondo blanco presenta un color amarillo pálido; en cambio, sobre un fondo oscuro ofrece una coloración azul clara. La estructura de baja densidad que origina estos efectos ópticos retarda también las ondas sonoras y refuerza el aislamiento térmico.





2. LA TENSION SUPERFICIAL contrae los geles cuando éstos se secan al aire. Esta misma tensión origina un menisco en la superficie libre de un líquido contenido en un tubo (*izquierda*). Las fuerzas de compresión ejercen una fuerza intensa hacia el interior (*flechas*). Los meniscos se forman también en los poros de un gel bañado en líquido (*derecha*). A medida que el líquido se evapora, los meniscos se retiran y se contrae el gel.

granulares resulta más económica que la de los bloques monolíticos.

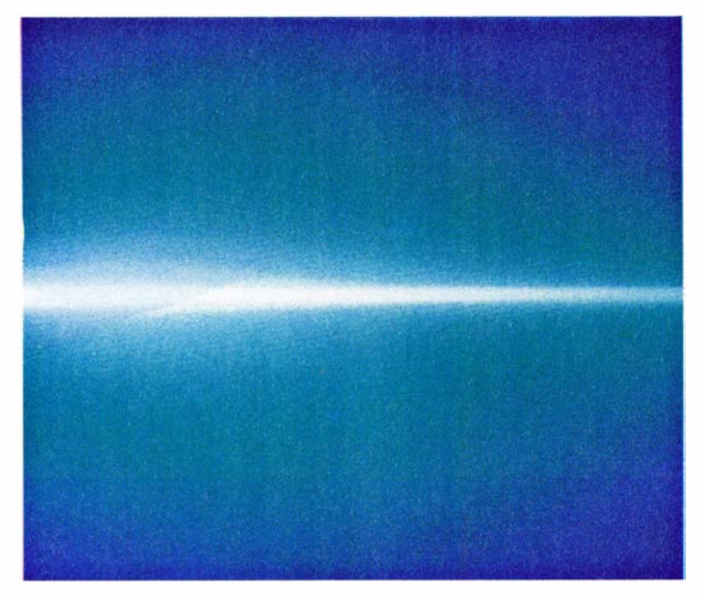
El interés del grupo francés por la investigación en aerogeles fue propiciado por una iniciativa gubernamental dirigida a encontrar materiales porosos capaces de almacenar el oxígeno y los combustibles utilizados en los cohetes espaciales. Sin embargo, el desarrollo posterior de los aerogeles se debió, en gran medida, a su utilización en los detectores de la radiación de Cerenkov. La radiación de Cerenkov se emite cuando las partículas cargadas (piones, muones y protones) se mueven a través de un medio con una velocidad superior a la de la luz en ese mismo medio. Estas partículas producen una emisión de luz con un frente en forma de cono en torno a la dirección de su estela. Esa onda de choque eléctrica recuerda la onda de choque acústica que se produce cuando un avión vuela a velocidad supersónica.

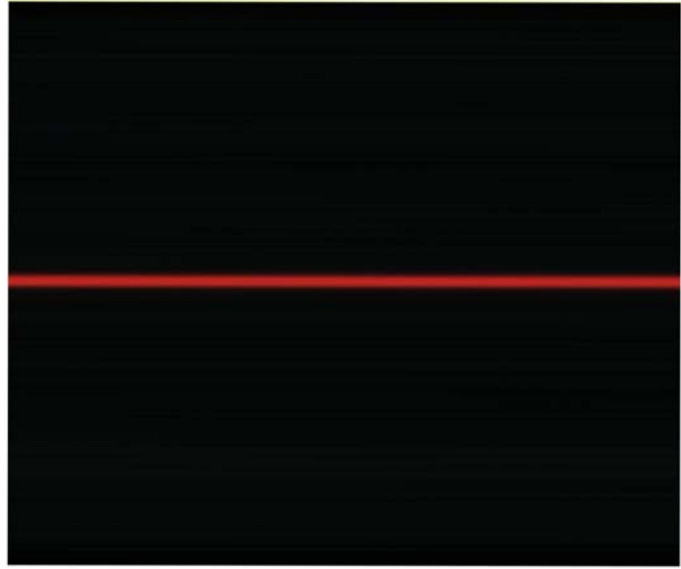
La velocidad de la partícula se puede inferir conociendo el ángulo del cono; ángulo que está formado por el frente de onda y la trayectoria de la partícula. La velocidad de la luz en un medio viene determinada por el índice de refracción de dicho medio. Los índices de refracción de los aerogeles se sitúan en una región que ni los gases comprimidos ni los líquidos pueden cubrir. Los aerogeles se han incorporado ya a varios detectores de Cerenkov en todo el mundo. La verdad es que se trata del destino común de estos materiales.

Dos grupos han seguido el método de Teichner para crear bloques de aerogel destinados a la construcción de tales detectores. Günther Poelz y sus colaboradores del Sincrotrón de Electrones Alemán (DESY), en Hamburgo, prepararon un detector con 1700 litros de aerogel de sílice. En la Universidad de Lund, en Suecia, Sten Henning y Guy v. Dardel fabricaron unos 1000 litros de aerogel para un experimento del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). Para producir grandes bloques, con unas dimensiones de 60 × 60 centímetros, el grupo sueco utilizó una instalación con un autoclave de 3000 litros de capacidad. En el año 1984, la junta principal del autoclave falló y más de 1000 litros de metanol se derramaron por el edificio. La explosión que tuvo lugar a continuación destruyó todas las instalaciones. Lejos de desalentarse, el equipo sueco construyó nuevas instalaciones con un autoclave igualmente voluminoso y espera reanudar la producción en un plazo breve.

La investigación actual centra su objetivo principal en la producción de grandes cantidades de bloques o granos con un bajo coste económico, para su aplicación en ventanas y colectores solares pasivos. La utilidad de los aerogeles se basa en sus excelentes cualidades como aislantes térmicos, merced a su elevada porosidad. El origen de esta porosidad se comprenderá en cuanto nos adentremos en la estructura peculiar de los geles.

Las primeras indicaciones sobre el tamaño de las unidades estructurales de los aerogeles se obtuvieron como re-





3. DISPERSION DE RAYLEIGH en los bloques de aerogel. Dicho fenómeno, que nos informa sobre la estructura de estos materiales, se produce cuando la luz —originada en este caso por un haz de láser— atraviesa un medio que contiene inhomogeneidades cuyo tamaño es menor que la longitud de onda de la luz visible. El tamaño de las partículas que constituyen los aerogeles da lugar a que las longitudes de onda cortas que corresponden a la luz azul (*izquierda*) se dispersen mucho más que las longitudes de onda largas que corresponden a la luz roja (*derecha*). Estas fotografías han sido realizadas por Wolfram Görlitz.

sultado de una dispersión de Rayleigh, el fenómeno responsable de la dispersión de la luz solar en la atmósfera. La dispersión de Rayleigh se produce cuando en un medio existen heterogeneidades cuyas dimensiones son menores que las longitudes de onda de la luz visible. La presencia de estas inhomogeneidades produce una desviación de los rayos luminosos; el rendimiento de la dispersión de Rayleigh disminuye espectacularmente conforme aumenta la longitud de onda de la luz. En consecuencia, la luz roja, cuyas longitudes de onda son del orden de 700 nanómetros, sólo se difunde en una proporción de uno a diez frente a luz azul, cuyas longitudes de onda son del orden de 400 nanómetros (un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro).

Esta es la razón por la que, cuando observamos el Sol a través de la atmósfera, al amanecer o al atardecer, nos parece amarillo o rojo, y en cambio, cuando el Sol está en su apogeo, el cielo nos parece azul. De forma análoga, los bloques de aerogel presentan un tono amarillo cuando se observan con la luz en contra, y un tono azul cuando el fondo es oscuro. De esta observación se desprende que las entidades estructurales de los aerogeles son menores que las longitudes de onda de la luz visible; como resultado de las medidas precisas de estos efectos ópticos, se llega a la conclusión de que el tamaño de las mayores entidades es del orden de 50 nanómetros.

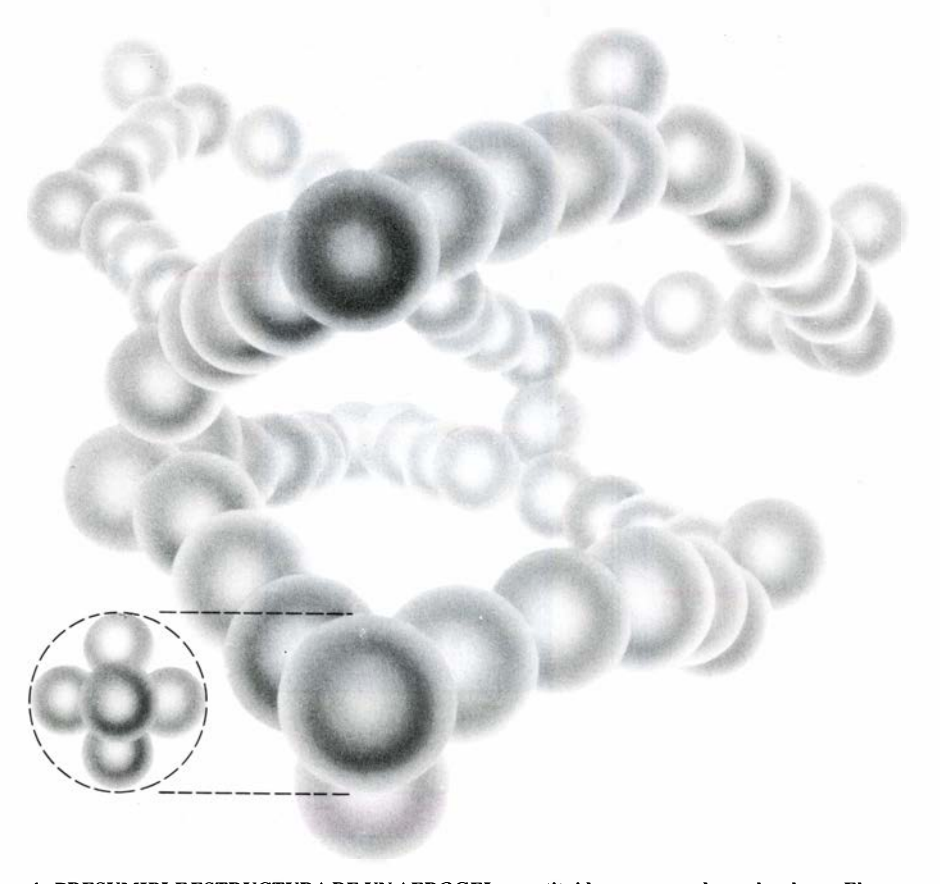
La técnica microscópica que se muestra más adecuada para llevar a cabo el análisis estructural de los aerogeles se basa en la interacción entre un haz de rayos X o de neutrones y el bloque de gel a ángulos muy pequeños. Esta técnica permite sondear la estructura de los aerogeles, desde sus niveles atómicos, hasta un orden de 50 nanómetros. Se puede obtener también información de la estructura observando la influencia de la presión del gas sobre las propiedades térmicas del material. Los datos obtenidos en todos esos ensayos no siempre son fáciles de interpretar. El modelo compuesto desarrollado por los investigadores para representar los aerogeles catalizados se funda en el empleo de esferas, agregados y cadenas [*véase la figura 4*].

En los aerogeles de sílice fabricados, a partir de TMOS, bajo condiciones básicas, las estructuras más densas corresponden a esferas no porosas con un diámetro inferior al nanómetro. Estas "partículas primarias" alcanzan la densidad de un vidrio de sílice ordinario: unos 2000 kilogramos por metro cúbico. Las partículas primarias se unen entre sí y forman "partículas secundarias" porosas, con un diámetro del orden de dos nanómetros. La densidad de estos agregados es la mitad de la de un vidrio de sílice; el área de su superficie puede llegar a alcanzar los 600 u 800 metros cuadrados por gramo. A la vista de tales cifras, no debería sorprendernos la enorme capacidad absorbente de humedad que poseen los aerogeles.

Las dimensiones del delicado esqueleto de un aerogel varían entre los 2 y 50 nanómetros. Al parecer, este esqueleto está constituido por una serie de cadenas que se unen y enlazan entre sí para dar lugar a una macroestructura extraordinariamente porosa. El grado de unión y contacto entre las cadenas depende de la densidad del aerogel y responde probablemente de la mayoría de las diferencias existentes en sus propiedades ópticas, térmicas y acústicas.

Aludí antes a las fascinantes propiedades ópticas de los aerogeles. Los aspectos más importantes de sus propiedades térmicas se estudiaron ya en los primeros trabajos de Kistler y en las investigaciones llevadas a cabo hace más de 20 años por M. G. Kaganer, del Instituto Soviético de Investigación Científica de la Construcción de Máquinas de Compresión y Criogénicas, en Moscú. En los últimos cinco años, mi propio grupo de investigación de física térmica ha llevado a cabo, en Würzburg, unos análisis más detallados.

Las pérdidas térmicas habituales de un sistema aislante se miden en términos de una magnitud conocida como coeficiente de pérdida térmica. Este coeficiente proporciona la potencia en watt que atraviesa una superficie de material de un metro por un metro, cuando la diferencia de temperaturas a ambos lados de dicha superficie vale un grado centígrado. Los colaboradores de mi grupo Dietrich Büttner, Peter Scheuerpflug y Ulrich Heinemann encontraron que una capa al vacío de aerogel de baja densidad, de tan sólo 15 milímetros de espesor, poseía un coeficiente de pérdida térmica de unos 0,5 watt por metro cuadrado y grado centígrado, para temperaturas com-



4. PRESUMIBLE ESTRUCTURA DE UN AEROGEL, constituida por agregados moleculares. El menor de estos agregados, o "partícula primaria", consiste en esferas de tamaño inferior al nanómetro (milmillonésima parte del metro). Estas esferas tienen la misma densidad que el vidrio ordinario no poroso. Las esferas se unen entre sí para dar lugar a las "partículas secundarias", cuya densidad es la mitad que la del vidrio. Las partículas secundarias se agrupan formando cadenas y crean el esqueleto del aerogel, una estructura delicada y porosa cuya densidad es del orden del 5 por ciento con respecto al vidrio ordinario.

prendidas entre 10 y 20 grados centígrados. En comparación, el coeficiente de pérdida térmica de un panel de vidrio ordinario sería de unos 6 watt por metro cuadrado y grado centígrado.

Las pérdidas térmicas de los mejores sistemas de ventanas de que se dispone en la actualidad, fabricados con cristales dobles plateados y con gas argón interpuesto, triplican las pérdidas de los sistemas que utilizan paneles de aerogel. En consecuencia, el empleo de estos paneles en las ventanas podría reducir notablemente el coste de la calefacción en los países fríos, particularmente en aquellas regiones que son muy soleadas en invierno. Las ventanas provistas de láminas de aerogeles presentarían un aspecto ligeramente translúcido y, por tanto, no podrían reemplazar por completo a los vidrios ordinarios. El hecho de que, en el plazo de un par de años, algunos industriales esperan poder fabricar sistemas de vidrios de ventana con aerogel constituye una buena prueba del ahorro que podría conseguirse con estos sistemas, incluso en el caso de que su utilización fuera limitada.

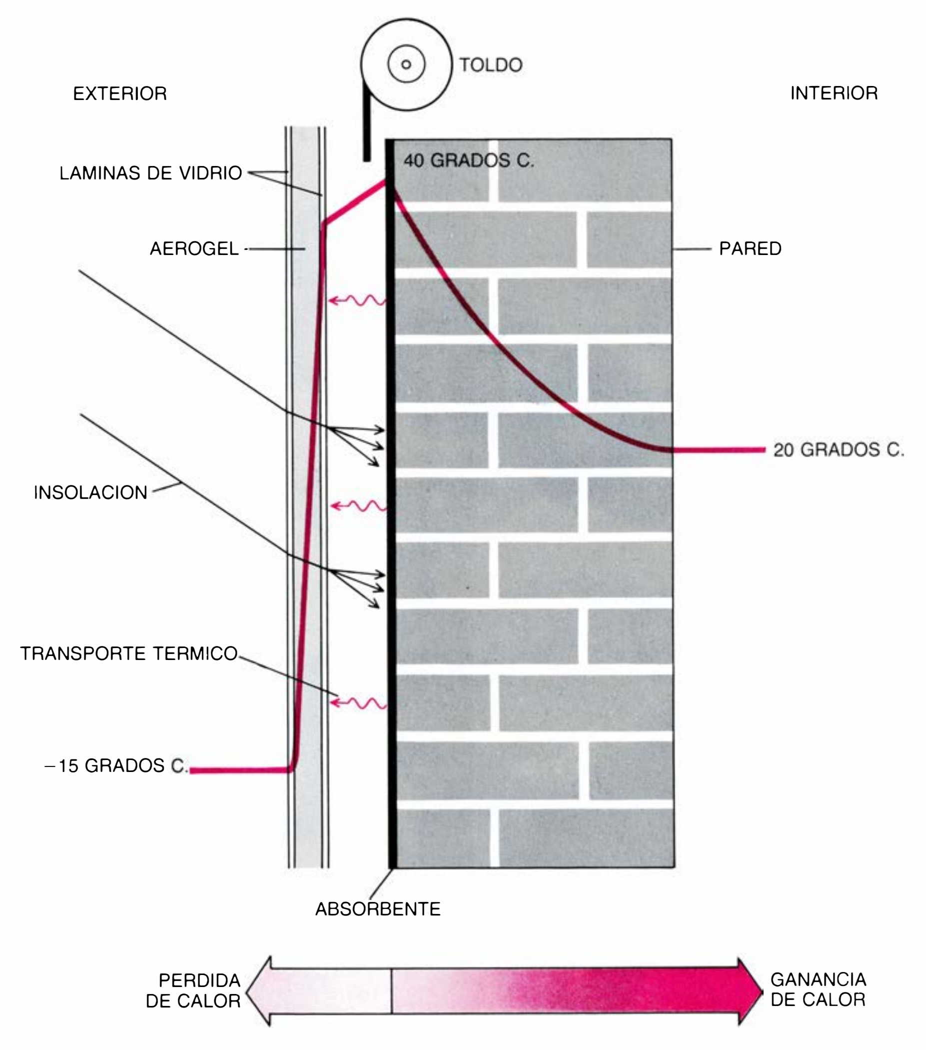
De forma análoga, los aerogeles podrían mejorar el uso pasivo de la energía solar. La pared ennegrecida de una casa, protegida térmicamente por una capa de aerogel, retendría el calor que proporciona la radiación solar. Debido a las propiedades aislantes de la lámina de aerogel, la mayoría del calor atravesaría la pared y penetraría en la casa [*véase la figura 5*]. Esta pared aislante parecería de color gris debido a la luz reflejada y difundida, y sería eficaz en la exposición al este, al sur o al oeste.

Para que el rendimiento de los aerogeles en tales sistemas aislantes y en colectores solares sea óptimo, debemos tener en cuenta todos los factores que gobiernan las pérdidas térmicas. Las pérdidas térmicas asociadas con un determinado material dependen de cuán eficaz sea el transporte térmico a través del material. En medios dispersos tales como los aerogeles, la propagación del calor tiene lugar mediante dos mecanismos diferentes. En primer lugar, se produce una conducción térmica a lo largo de las cadenas de contacto de la delicada estructura del aerogel. La contribución de este mecanismo se reduce al aumentar la porosidad del material (lo cual equivale a disminuir su densidad), pero su dependencia con la temperatura es pequeña. Sin embargo, el otro medio de propagación sí depende estrechamente de la temperatura: se trata de la transmisión por radiación térmica.

La radiación térmica consiste en la emisión de fotones por parte de todos los cuerpos calientes; esta emisión se absorbe o se difunde en todas las superficies que se interponen en la trayectoria de dichos fotones. El espectro de la radiación térmica se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas cuando la temperatura aumenta: los cuerpos muy calientes, tales como el Sol, emiten fotones cuyas longitudes de onda se sitúan en el espectro visible, en tanto que las paredes, las ventanas y el cuerpo humano radían fotones infrarojos, con longitudes de onda entre 5 y 20 micrometros (el micrometro es la millonésima parte del metro).

Los aerogeles de sílice pueden absorber bastante bien la radiación infraroja procedente de las paredes y ventanas con longitudes de onda por encima de los cinco micrometros; por tanto, están capacitados para bloquear, de forma efectiva, la radiación térmica a temperatura ambiente. Sin embargo, entre tres y cinco micrometros la absorción es baja. En consecuencia, las propiedades aislantes de los aerogeles se deterioran a medida que las temperaturas aumentan; la cantidad de calor que atraviesa la capa de aerogel se hace mayor. Este fenómeno fue abordado por Roland Caps, de mi grupo de investigación.

En el caso de las ventanas, podemos mitigar el problema de las pérdidas por radiación revistiendo con una capa plateada de "emisividad baja" una de las superficies interiores de los dos paneles de vidrio. Estos recubrimientos se utilizan ya actualmente en los sistemas de ventanas con vidrios dobles separados por gas argón; la radiación térmica que

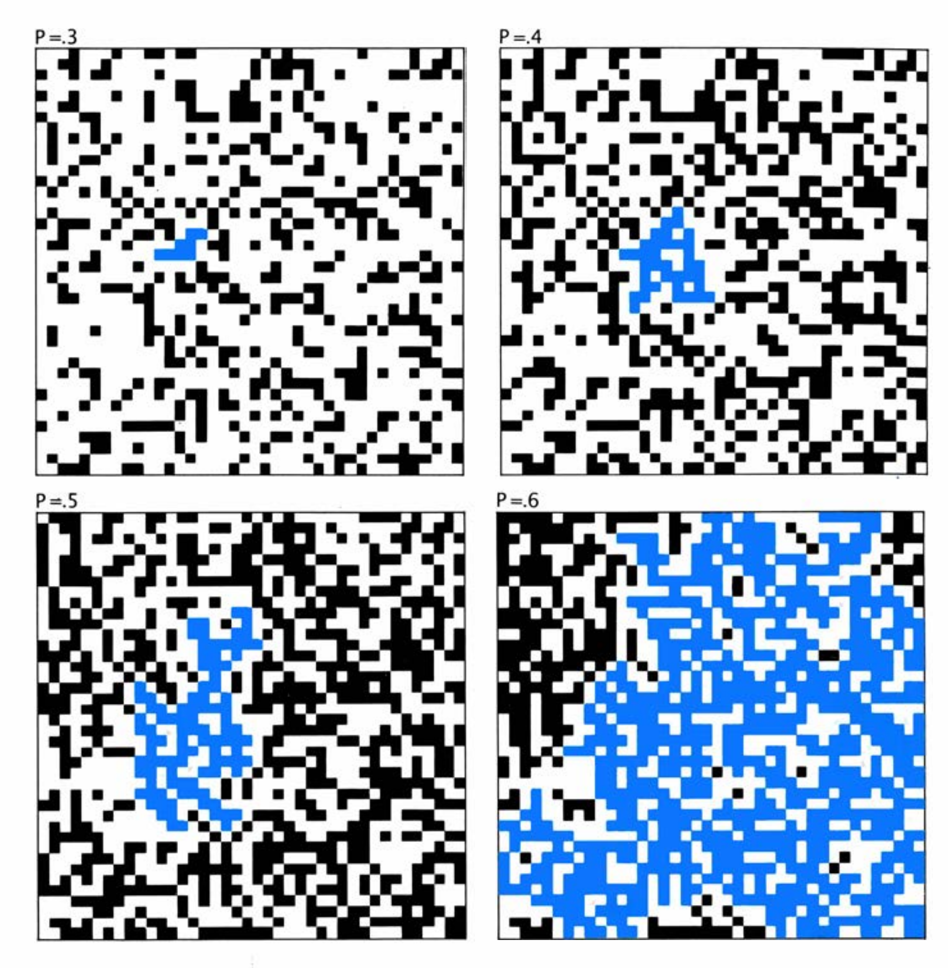


5. CONSECUCION DE UN AISLAMIENTO TRANSPARENTE mediante una lámina de aerogel situada entre dos láminas de vidrio. La utilización de un aislamiento de este tipo en las paredes de una casa aumentaría notablemente las posibilidades de la captación solar pasiva. La pared en cuestión se halla recubierta con un material absorbente negro, que convierte los rayos solares en calor. Por ser el aerogel un aislante mucho mejor que la pared, la mayoría del calor generado en el revestimento atraviesa la pared y penetra en el interior de la casa, en vez de escapar hacia el exterior. En el verano tendría que cubrirse ese absorbente.

emiten es unas 10 veces menor que la de las superficies de vidrio ordinario.

La variación del coeficiente de pérdida térmica con la presión del gas podría plantear algunos problemas a los posibles fabricantes de sistemas de ventanas con aerogeles. Las pérdidas térmicas en los bloques de aerogel aumentan notablemente por encima de los 100 milibares; un sistema de ventanas con un vacío del orden de un milibar en el momento de su fabricación mantendría un nivel de vacío por debajo de ese umbral durante un tiempo de 30 años, siempre que la cuantía de las pérdidas no llegaran a los 100 microgramos de aire por día y por metro cuadrado de superficie del vidrio. Esta tasa de pérdida podría obtenerse utilizando sistemas de sellado con materiales orgánicos de alta calidad, tales como los que se emplean en los sistemas dotados de gas argón.

El coeficiente de pérdidas térmicas de los granos de aerogel muestra una sensibilidad mucho mayor a la presión del aire. El valor de este coeficiente aumenta considerablemente para presiones bajas, de una décima de milibar, por ejemplo. Las ventanas con espaciadores de granos tendrían que sellarse utilizando sistemas de obturación metálicos o de vidrio, actualmente en fase de investigación. Los espaciadores de granos llenos de argón, más fáciles de fabricar, poseen, sin embargo, menor poder aislante que los sistemas al vacío.



6. FIGURAS EN FORMA DE TABLERO DE AJEDREZ, generadas por ordenador. Simulan el proceso sol-gel. Las casillas claras representan la solución; las negras, el gel. Las zonas interconectadas del tablero aparecen en color. La probabilidad de que una de las casillas esté pintada de negro corresponde al tiempo transcurrido desde que se inició la formación del gel. Para cierto valor crítico de la probabilidad *P*, las casillas se hacen contiguas; de forma análoga, en un proceso sol-gel existe un umbral crítico para el cual los agregados que constituyen el gel se tornan coherentes. Estas figuras han sido obtenidas por Manfred Gronauer.

La implantación de los aerogeles en los sistemas de aislamiento térmico exigirá, además, la resolución previa del problema del "deslizamiento". Se usa el nombre de deslizamiento para describir la tendencia de los aerogeles a cambiar de forma cuando se les somete a una carga externa constante. Este fenómeno fue descubierto por uno de los miembros de mi grupo, Joachim Gross, que lo está investigando actualmente. El deslizamiento está probablemente relacionado con el agua adsorbida por las superficies internas del material; sus efectos podrían reducirse calentando el aerogel sintetizado, a fin de extraer así el agua adsorbida.

Mi grupo de Würzburg ha llevado también a cabo un amplio estudio sobre las propiedades acústicas de los aerogeles. Nuestras primeras medidas sobre la velocidad de propagación del sonido en aerogeles se realizaron hace unos cuatro años. Utilizando un transductor piezoeléctrico, dispositivo que vibra cuando se le aplica un campo eléctrico alterno, procedimos a enviar pulsos de ondas ultrasónicas a través de láminas de aerogeles. Cuando examinamos los resultados, dudamos si creer lo que estábamos viendo: ¡el sonido se propagaba a través de los aerogeles a velocidades del orden de 100 a 300 metros por segundo! Aunque velocidades tan bajas son habituales en los materiales fácilmente compresibles, como el caucho, resultan sorprendentes en un material cuyos componentes son los mismos que los del vidrio ordinario, a través del cual las ondas sonoras se propagan con una velocidad de 5000 metros por segundo.

El descubrimiento de Gross produjo mayor sorpresa: la velocidad del sonido en los aerogeles disminuía cuando estos materiales se sometían a tensión mecánica. La mayoría de los sólidos se hacen más compactos cuando se comprimen y, por tanto, la propagación del sonido a través de ellos tiene lugar a una velocidad más alta. Por el contrario, los aerogeles se hacen más blandos, debido posiblemente a las alteraciones que se producen en la configuración de su esqueleto.

La combinación de la baja velocidad del sonido con la baja densidad de los aerogeles significa que la impedancia acústica de estos materiales, cuyo valor viene dado por el producto de estas dos magnitudes, será baja. En realidad, la impedancia de los aerogeles tiene un valor intermedio entre los transductores piezoeléctricos cerámicos y el aire. En consecuencia, los aerogeles podrían contribuir a aumentar el rendimiento de dichos transductores, que son componentes ordinarios de las cámaras fotográficas y de los sistemas robóticos diseñados para medir distancias con emisión de ondas ultrasónicas.

Una capa delgada de aerogel depositada sobre la superficie del transductor podría actuar de amortiguador entre los valores, muy dispares, de la impedancia del aire y del transductor, permitiendo reducir la reflexión de las ondas sonoras. En nuestra opinión, la utilización de estos aerogeles posibili-

taría aumentar la energía de los ultrasonidos emitidos por los dispositivos piezoeléctricos en un factor del orden de 100. Pero hasta la fecha no se han empleado los aerogeles en estos dispositivos y, por tanto, se ignora su utilidad práctica.

No quisiera terminar este artículo sin mencionar otros dos temas interesantes relacionados con la estructura de los aerogeles. Me referiré, en primer lugar, al fenómeno de la percolación. Voz de origen latino que significa "fluir a través de algo", y puede aplicarse a procesos muy diversos: desde el agua que gotea por el café molido hasta la corriente eléctrica que atraviesa un material conductor muy poroso. En un sistema de aerogel, este término designa la conducción térmica a través del gel. Para que la percolación tenga lugar, el cuerpo del gel debe ser coherente; el proceso de sol-gel se caracteriza por la existencia de cierto punto crítico para el que la densidad de los agregados moleculares permite formar un cuerpo coherente.

Este "umbral de percolación" se puede determinar con la ayuda de simulaciones por ordenador que construyen figuras parecidas a un tablero de ajedrez en dos o tres dimensiones. Las casillas que representan a los agregados del gel están pintadas en negro al azar; se identifican mediante un parámetro, la probabilidad de ocupación, que está correlacionada con la densidad del gel. Cuanto mayor sea la probabilidad de ocupación, tanta mayor probabilidad habrá de que determinada celda esté "ocupada" o pintada de negro. En este contexto, una probabilidad de ocupación baja corresponde a una densidad baja de agregados en la solución; a medida que dicha probabilidad aumenta, aparecen nuevos agregados, hasta que llega un momento en que se supera el umbral de percolación y los agregados forman un campo coherente. En el caso de los aerogeles, el umbral de percolación es extremadamente bajo, tal como cabría esperar de su baja densidad.

Estas simulaciones en forma de tablero de ajedrez han permitido también poner de manifiesto que, para densidades superiores a la umbral, las propiedades mecánicas de los aerogeles dependen del exceso de densidad. En particular, dichas propiedades varían con la diferencia entre la densidad real del material y la densidad crítica, elevada a una potencia mayor que la unidad. En ese orden, mi colega Ove Nilsson ha demostrado que la conducción térmica de una muestra de aerogel cambia si ésta se comprime; para ciertos intervalos de compresión, la conducción es proporcional al exceso de densidad elevado a una potencia de 1,6. En mi laboratorio de Würzburg, hemos encontrado que el módulo de elasticidad de los aerogeles, magnitud de la que dependen sus propiedades acústicas, varía con el exceso de densidad de forma todavía más crítica, exactamente a una potencia de 3,7.

Las leyes anteriores son importantes, no sólo desde un punto de vista teórico, sino también para la optimización práctica de sistemas tales como los granos de aerogel utilizados en las ventanas aislantes. Trabajando en mi laboratorio, Ernst Hümmer ha llegado recientemente a la conclusión de que la conducción térmica sólida de dichos sistemas varía muy poco con la densidad del material granulado.

Otro aspecto intrigante de la estructura de los aerogeles se refiere a su fractalidad. Al parecer, el esqueleto de los aerogeles es fractal, es decir, se trata de un sistema similar a sí mismo cuyas propiedades geométricas se repiten a lo largo de innumerables escalas de longitud. Dale W. Schaefer y sus colaboradores, de los Laboratorios Sandia, pusieron de manifiesto la naturaleza fractal de los aerogeles: las recientes investigaciones sobre aerogeles, sistemáticas y acometidas bajo condiciones estrictamente controladas, demostraron que su comportamiento fractal cambia con el valor del *p*H y con la concentración de la solución de partida. En esa labor han intervenido René Vacher, Thierry Woignier y Jacques Pelous, de la Universidad de Montpellier, y Eric Courtens, del laboratorio de investigación de IBM en Zurich.

Los estudios recientes de los aerogeles como entidades fractales pusieron de relieve la importancia de un control preciso en el proceso de sol-gel. Para adaptar la microestructura de los aerogeles a cada aplicación particular, será también necesario seguir avanzando en el estudio de este proceso en la región de 0,1 a 100 nanómetros. Por otra parte, los aerogeles no sólo son materiales de valor intrínseco, sino que pueden convertirse en precursores importantes en la producción de vidrio de alta calidad óptica. El estudio de la transición gel-vidrio y sus ventajas potenciales constituye una historia con personalidad propia; a medida que avance el conocimiento de estos sólidos peculiares, habrá muchas otras historias que contar.

El osario del estrecho de Indian

Un conjunto de tumbas de 1000 años de antigüedad corrobora los indicios de que en las costas de Nueva Inglaterra hubo una población asentada siglos antes de la llegada de los europeos

Francis P. McManamon y James W. Bradley

En septiembre de 1979 se requirió la presencia de los arqueólogos del Servicio del Parque Nacional estadounidense que supervisan los restos prehistóricos del litoral de cabo de Cod en una localidad del estrecho de Indian, una península de Wellfleet Harbor, en la parte exterior del cabo de Cod. Un trabajador que estaba abriendo un pozo para la fosa séptica de una granja exhumó huesos humanos. Los arqueólogos sospecharon que se trataba de un enterramiento prehistórico; para salvar el depósito restante, los propietarios permitieron que los autores y sus colegas del Servicio del Parque excavaran el material que quedaba. Los trabajos empezaron la semana siguiente y, tras dos días de cuidadosa labor de campo, se descubrió un enterramiento tan inesperado cuan interesante.

El corte tropezó con un conjunto de huesos que pertenecían por lo menos a 56 personas —hombres, mujeres y niños— enterradas juntas hace aproximadamente 1000 años. Constituye el ejemplo mejor documentado de osario en Nueva Inglaterra, y uno de los mejores documentados más allá del noroeste del estado de Nueva York, las zonas colindantes de Ontario y del área próxima al río Potomac y la bahía Chesapeake. Quizá sea también, hasta el momento, el testimonio más importante de lo que continúa siendo un problema abierto sobre la prehistoria de la Nueva Inglaterra costera: ¿cuál era el grado de asentamiento de los nativos en los siglos anteriores a la llegada de los europeos? En opinión de los autores, el osario, sumado a otros datos arqueológicos y al testimonio de los primeros europeos que exploraron la región, inclina el fiel de la balanza, apartándolo de los escenarios en los que la costa sólo conocía visitas esporádicas o campamentos estacionales en favor de un cuadro de habitación costera permanente.

Resultó evidente la naturaleza prehistórica del yacimiento, incluso antes de que, procediendo a través del nivel intacto próximo al corte de la azada, se alcanzara el estrato de los huesos. Unos cuantos centímetros por debajo del mantillo encontramos un antiguo vertedero que contenía conchas, huesos de animales, restos de útiles líticos y objetos por el estilo. El estrato superior del vertedero dio también un trozo de latón laminado que había servido para cortar; por tanto, al menos parte del depósito era posterior a la introducción de ese material por los europeos. Sin embargo, el tipo de artefactos líticos sugería que gran parte del yacimiento databa del período final de la prehistoria del noroeste, el de Bosque tardío, que comenzó alrededor del 900 d. de C. y concluyó con la llegada de los europeos. Puesto que el vertedero se encontraba por encima mismo de los huesos (con los que probablemente no está relacionado) el osario debe datarse en fecha anterior al contacto europeo.

El osario, situado a una profundidad de algo más de 30 centímetros, ofrecía un espectáculo sorprendente: un montón de huesos apilados, compacto, de metro y pico de ancho. La pila quizá tuviera originalmente el doble de su longitud en la dirección norte-sur: la azada había cortado buena parte de ella, puede que la mitad. La cara del corte mostraba que, en su punto más grueso, la capa de huesos medía unos 30 centímetros de profundidad.

A primera vista, parecía un montón revuelto. Examinando las cosas con mayor atención, allí imperaba algún tipo de organización. Los cráneos tendían a concentrarse a lo largo de los márgenes oriental y occidental del depósito, con otros huesos en medio. Los huesos largos tendían a disponerse en agregados paralelos, como puestos así adrede. Se demostró luego que algunos grupos correspondían a los huesos de una sola persona: dos húmeros, dos fémures y dos tibias, por ejemplo. La mayoría de los huesos no aparecían unidos por las articulaciones, circunstancia que sugería que se había eliminado la carne, o se había dejado descomponer, antes de que colocarlos en el osario.

Después de eliminar la tierra y dejarlos expuestos, comenzamos a trasladar los huesos para su posterior limpieza y estudio en el laboratorio. Observamos entonces que los de la parte baja del estrato estaban parcialmente quemados en la cara inferior. Pronto supimos la razón. Debajo del primer estrato apareció otro que contenía huesos densamente apiñados y parcialmente reducidos a cenizas. La masa de restos incinerados, que equivaldría a la mitad del primer estrato, no mostraba señales de organización interna alguna.

Los huesos aparecían completamente incinerados, pero la arena rojiza y anaranjada situada debajo del nivel de cremación apenas si había perdido color. Además, el estrato no contenía carbón. Parecía, por tanto, poco probable que los restos se hubieran incinerado en el hoyo mismo. Antes bien, la cremación se produjo verosímilmente en algún lugar próximo y los huesos, todavía ardiendo, se depositaron en el hoyo. Después se apilarían sobre el material incinerado los huesos no quemados, algunos de ellos en haz; el calor de los primeros chamuscaría parte de los segundos.

¿Cuándo se produjo ese enterramiento y por qué? A menudo, los hallazgos prehistóricos se fijan en una fecha según los útiles de piedra y fragmentos de cerámica encontrados en ellos. Tales vestigios eran escasos en el osario, si bien un extremo del depósito albergaba un gran petrosílice triangular, una roca ígnea ligeramente pigmentada. El objeto, caído allí por casualidad o depositado de intención, pertenecía al estilo Levanna, característico del período del Bosque tardío.

El análisis de carbono-14 de los hue-

sos confirmó esa primera datación. Las muestras de colágeno (el componente proteico del hueso) y apatita (el componente mineral) de huesos del estrato no quemado proporcionaron una antigüedad de aproximadamente 900 años, con un margen de incertidumbre de unos 200 años. El hueso carbonizado del estrato de incineración tiene 800 años, con un margen de error de 200 años. Nuestra conclusión es que el osario pertenecía a la primera época del Bosque tardío, probablemente del siglo x o principios del xi d. de C.

Los huesos revelaban también algunas circunstancias del enterramiento. Mediante un detallado análisis, Ann L. Magennis, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, contabilizó los restos de 47 personas en el estrato no quemado y por lo menos nueve más en el incinerado. El depósito contenía individuos de ambos sexos (se determinó el sexo de 14 personas a partir de la forma de la pelvis) y prácticamente de todas las edades. Los rasgos demográficos indicaban que el enterramiento no se limitaba a individuos de edad o rango específicos; antes bien, el depósito parecía contener los restos de esqueletos de todas las personas de la comunidad que murieron en un determinado período.

¿Se construyó el osario para albergar los muertos producidos por una masacre, el hambre o una epidemia, como sostenía la especulación popular cuando se descubrió el yacimiento? El estudio de Magennis reveló que la incidencia de traumatismos no se apartaba de la normalidad y que era escasa la frecuencia de los cambios estructurales de los huesos atribuibles a enfermedades infecciosas o la malnutrición. En realidad, la salud de la población del osario era bastante buena en comparación con la de otros grupos prehistóricos; ni siquiera era alta la incidencia de caries dentaria. (Tal comprobación, junto con un elevado número de dientes astillados, sugirieron a Magennis que la dieta de los moradores del osario se componía de una base relativamente pequeña de maíz y muchos alimentos silvestres.) El osario, por tanto, no constituye el monumento a una catástrofe prehistórica, sino que probablemente sea fruto de una práctica funeraria habitual.

Según parece, la separación de la carne y los huesos antes de enterrarlos formaba parte de dicha costumbre. El examen de los huesos no incinerados que ha realizado Magennis descubre que la tarea se dejaba al proceso de descomposición, bien en un primer enterramiento o directamente sobre el suelo. Sólo en dos casos encontró la investigadora marcas de corte que indicaran que se había arrancado la carne de los huesos: señales de escoplo cerca de las cuencas de los ojos de dos hombres adultos. Los huesos del estrato incinerado parecían haber estado también desnudos en el momento de la cremación. En opinión de Magennis, la incineración no sería tanto un método para limpiar los huesos antes de enterrarlos, cuanto un trato especial reservado a la inhumación de una parte de la comunidad.

¿Qué nos dice el osario sobre la forma de vida de las personas que lo construyeron? ¿Se trataba de nómadas, que se mudaban de un lugar a otro en función de la disponibilidad de recursos alimentarios, o de un pueblo sedentario, que disponía de diversos recursos al alcance de sus asentamientos? La cuestión incide de pleno en el debate sobre la naturaleza del sistema de asentamiento a lo largo de la costa de Nueva Inglaterra en los siglos inmediatos a la llegada de los europeos. En otras zonas, como el territorio del pueblo iroqués, al oeste de Nueva York y en Ontario meridional, los restos de pozos de almacenamiento de



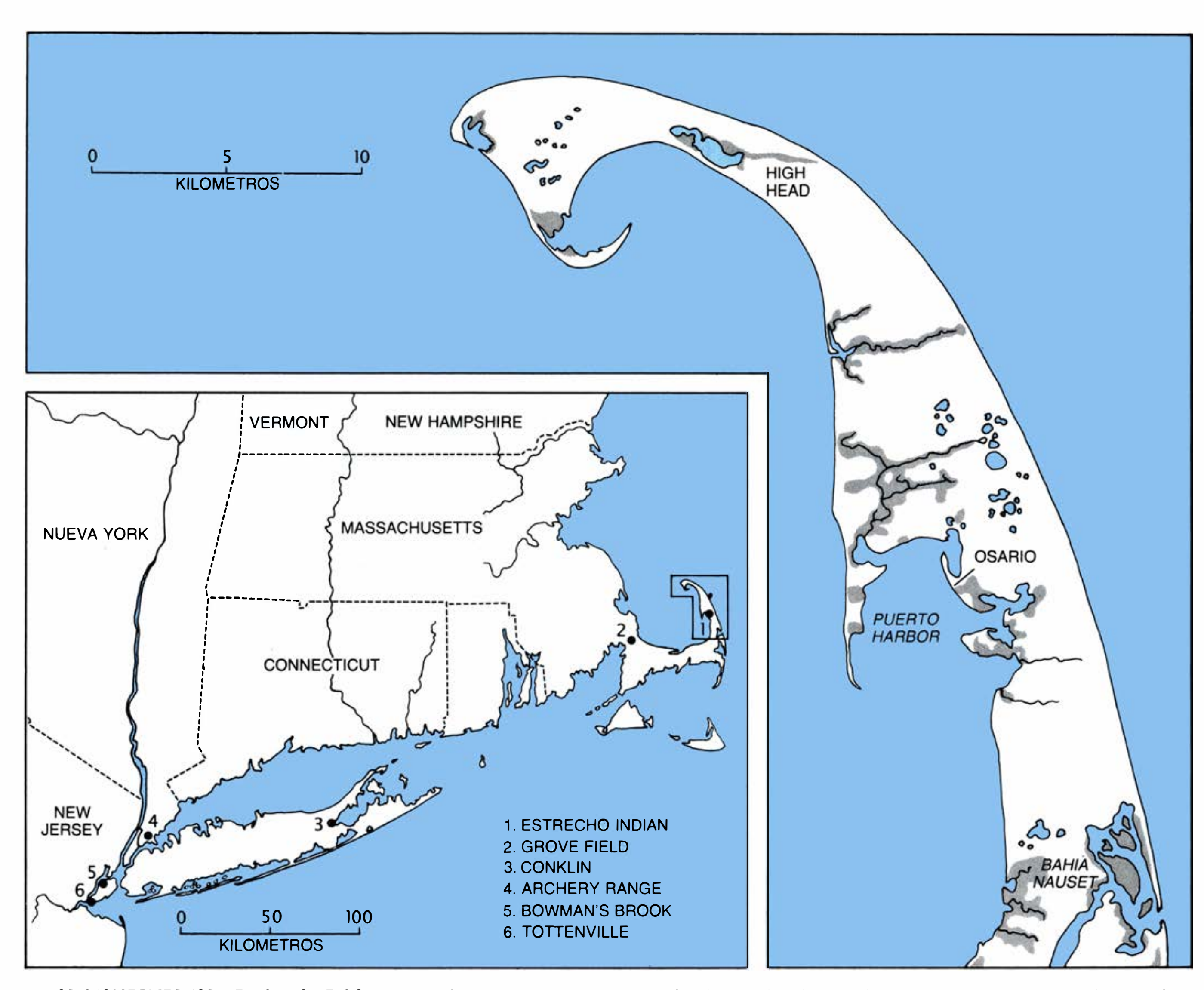
1. VISTA DE LA PARTE SUPERIOR DEL OSARIO. El depósito, fechado en el siglo x o principios del xi, contenía los huesos de 56 individuos, por lo menos, de ambos sexos y de todas las edades; según se cree, refleja las prácticas ceremoniales de enterramiento de una población sedentaria. La excavación arqueológica comenzó cuando, en el curso de un proyecto de una construcción, se desenterraron huesos humanos al cavar la zanja que se distingue a la derecha.

grano y viviendas densamente agrupadas, a veces rodeados por una empalizada, ofrecen un claro testimonio de instalaciones permanentes. Los restos arqueológicos de la costa, por el contrario, están dominados por vertederos, viviendas aisladas y contados depósitos de abastecimiento; signos inequívocos de que los asentamientos permanentes abundaban poco.

En los últimos años, un ejército de arqueólogos han excavado la costa desde Maine hasta Manhattan. Ante los resultados, se han creado tres modelos generales sobre la pauta de los asentamientos costeros. El primero, propuesto por Lynn Ceci, del Queens College de la Universidad de Nueva York, mantiene que la costa sólo se ocupó esporádicamente, por gentes que vivían en el interior y que hacían incursiones ocasionales en verano para pescar o recoger marisco. Según el cuadro de Ceci, los pueblos sedentarios sólo se expandieron a lo largo de la costa durante el período de Contacto, como resultado del comercio con los europeos y el estímulo para la fabricación de canutillos de madreperla que podían intercambiarse con las tribus del interior por pieles, cotizadas por los europeos.

En el segundo modelo, la costa se explota de modo regular e intensivo los veranos. Dean R. Snow, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, interpreta los asentamientos costeros de Vineyard, Long Island y el estuario del río Hudson, fechados en el período Arcaico Tardío (del 2500 al 500 a. de C.), como campamentos de verano. En su opinión los asentamientos testimonian un movimiento estacional en el que los pobladores trasladaban regularmente su residencia para explotar distintos recursos: marisco en los campamentos costeros de verano, por ejemplo, y ciervo en los campamentos invernales de los bosques de interior. Bert Salwen, de la Universidad de Nueva York, ha sugerido que ese mismo movimiento estacional prevaleció a lo largo de todo el período del Bosque (500 a. de C. a 1500 d. de C.), e incluso en el período del Contacto europeo.

El tercer modelo postula un asentamiento permanente de algunos puntos de la costa a partir del 2500 a. de C. Los pobladores establecerían también campamentos temporales a lo largo de la costa para la caza y actividades especializadas y, quizá, campamentos estacionales en el interior; la base permanente no sería un recinto denso y complejo, pero se encontraría ocupado continuamente. David Sanger, de la Universidad de Maine en Orono, que ha encontrado señales de actividad a lo largo de todo el año en distintos puntos de la costa del Maine, defiende esa tesis, igual que Arthur E. Spiess, de la



2. PORCION EXTERIOR DEL CABO DE COD, que ha albergado restos prehistóricos en numerosos yacimientos: el osario de la península del estrecho de Indian y múltiples concentraciones de restos alrededor de la bahía de Nauset, el puerto de Wellfleet y High Head. Los útiles fueron dejados, al parecer, por una población prehistórica que vivía todo el año en la zona exterior del cabo y explotaba los recursos del océano, salinas, zonas húmedas de agua potable y bosques del interior. El mapa del recuadro muestra las localizaciones de osarios conocidos y supuestos en la costa nordeste del continente norteamericano.

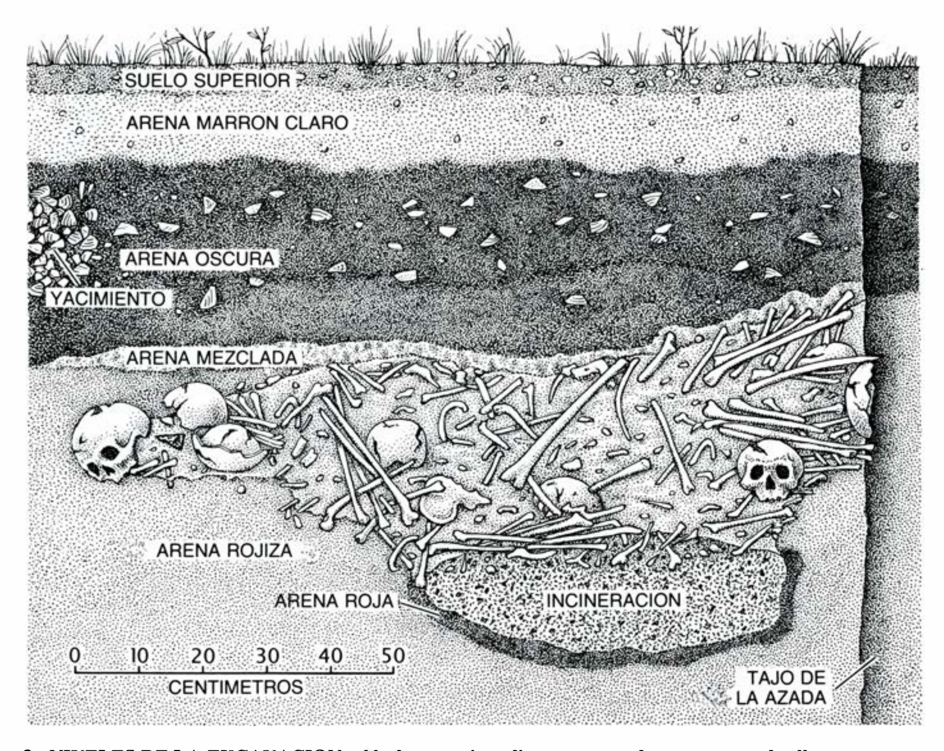
Comisión de Conservación de la Historia del Maine, y Bruce J. Bourque, del museo estatal de Maine. Kent G. Lightfoot, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores presentaron recientemente pruebas de un cambio similar de asentamiento al este de Long Island.

El osario del estrecho de Indian puede ayudarnos a adoptar uno de los modelos. Ese cementerio, el ejemplo más claro de ese tipo de depósitos en Nueva Inglaterra, es improbable que constituya una anomalía. La historia de la arqueología cuenta que, en 1911, se excavó otro osario en Grove Field, cerca de la ciudad de Bourne, en el extremo del cabo de Cod. Osarios conocidos o supuestos hay en cuatro puntos de la zona costera de Nueva York, un área que a finales de la prehistoria debió albergar una cultura similar a la de la costa de Nueva Inglaterra. Si los osarios constituían una característica regular de la cultura prehistórica de la región, parece razonable juzgar el significado del depósito del estrecho de Indian mediante el examen de los rasgos de otras sociedades nativas que enterraban sus muertos en osarios.

Los datos sugieren que tales prácticas de enterramiento denotan una forma de vida sedentaria, del tipo descrito en el tercer modelo de asentamientos costeros. El cuadro más claro de osarios y su contexto cultural procede de la región de los hurones, en Ontario. Según los hallazgos arqueológicos y los detallados relatos dejados por los primeros europeos que penetraron en esa región (misioneros franceses de la Compañía de Jesús y Agustinos recoletos), se construía un osario cerca de cada población sedentaria, habitualmente a menos de 100 metros de ella. El osario no sólo albergaba los restos de esa población, sino también los de poblaciones de alrededor, algunas de ellas situadas a más de 15 kilómetros.

Las interpretaciones modernas de los relatos de los misioneros entienden que los osarios servían como centros rituales destinados a reafirmar los lazos sociales entre poblados surgidos, por crecimiento demográfico, de un mismo tronco ancestral. Cada ocho, 10 o 12 años, los habitantes de los poblados separados recogerían los restos de sus difuntos y regresarían al punto de origen. Allí, entre reuniones y festejos, los congregados depositarían los huesos en el osario.

Cerca de la desembocadura del río Potomac, a lo largo de la bahía de Chesapeake y en la llanura costera de Carolina del Norte, también se han excavado osarios. Esas áreas carecen de



3. NIVELES DE LA EXCAVACION: el lecho superior, diversas capas de arenas, una de ellas con un yacimiento de restos —un montón de basura compuesta fundamentalmente por conchas— y el osario. Un conjunto de huesos sin quemar forma el estrato superior del osario; en los bordes se concentran los cráneos y en el centro los huesos largos; en el estrato más profundo se encontraron los huesos incinerados. A la derecha se distingue el corte efectuado por la azada, que quizá haya destruido la mitad del estrato no quemado. La ilustración se basa en otra de Thomas Mahlstedt, de la Comisión del distrito metropolitano de Boston.

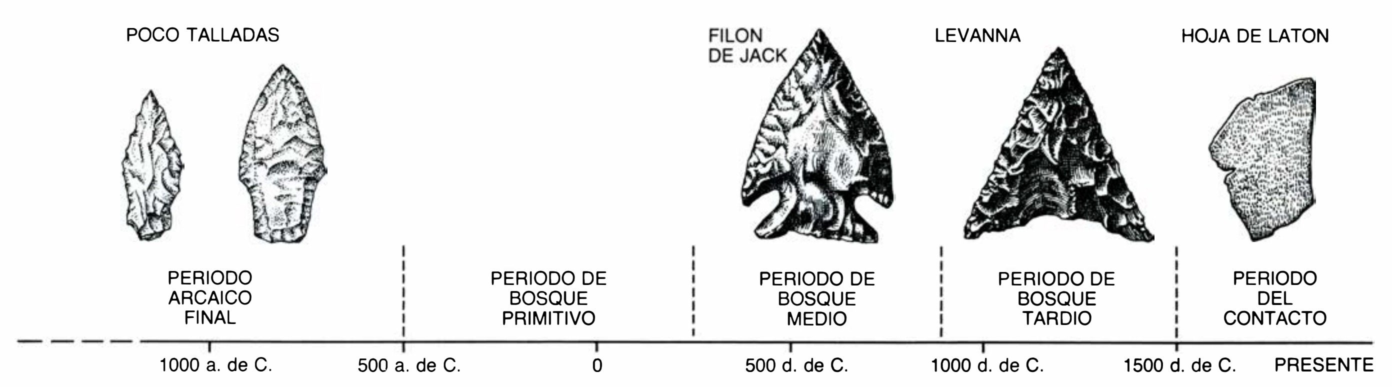
las detalladas descripciones de la vida nativa que los misioneros dejaron sobre los hurones. Los hallazgos arqueológicos, sin embargo, establecen de nuevo una estrecha relación entre los osarios y el sedentarismo.

Para confirmar la existencia de ese mismo nexo entre enterramientos y forma de vida sedentaria en el cabo de Cod, nos remitimos a los registros arqueológicos generales de la zona, especialmente abundantes respecto del período del Bosque tardío, cuyo comienzo viene a coincidir con la fecha del osario. Un estudio de 779 yacimientos del cabo de Cod, Martha's Vineyard y Nantucket realizado por la Comisión Histórica de Massachusetts encontró que, a partir de los estilos de los utensilios, podían asignarse al período del Bosque tardío más lugares que a ningún otro período. Quizás alcanzara entonces la población prehistórica del cabo de Cod su apogeo.

De la forma de vida de los pobladores del Cabo exterior, se ha ocupado el Servicio Arqueológico del Parque (bajo cuyo patrocinio se excavó el osario). Las campañas de investigación, desde 1979 hasta 1986, pretendían determinar qué actividades humanas se desarrollaron en los lugares prehistóricos del National Seashore y cuál era su organización geográfica y estacional. Para responder a la última cuestión ha sido decisivo el análisis de los moluscos obtenidos de los asentamientos prehistóricos.

Los pobladores prehistóricos del cabo de Cod reunieron grandes cantidades de conchas del molusco bivalvo *Mercenaria mercenaria*. Por la concha suele saberse cuándo se recogieron las almejas. Cada año, el molusco segrega una franja de concha nueva, grabada con centenares de microscópicas líneas de crecimiento que registran el ciclo diario de la marea. Contando las finas líneas del último incremento anual de la concha se puede a veces deducir la estación, o incluso el mes, de la muerte del ejemplar. Las conchas de un depósito prehistórico pueden, así, revelar la cronología de recolección de los moluscos e incluso ofrecer indicios acerca de la estación de ocupación.

Mary E. Hancock y Alison Dwyer, que trabajaron en la supervisión del Servicio del Parque a principios de la década de 1980, analizaron conchas de 16 puntos de restos prehistóricos del National Seashore. Las concentraciones incluían también diversas combinaciones de otros restos: puntas y lajas de piedra, roca partida al fuego y desechos orgánicos, como carbón y hueso animal. Por los estilos de los útiles, o por datación de carbono-14, las concentraciones se asignaron a un amplio intervalo de tiempo, desde el Arcaico Final hasta el período del Bosque tar-

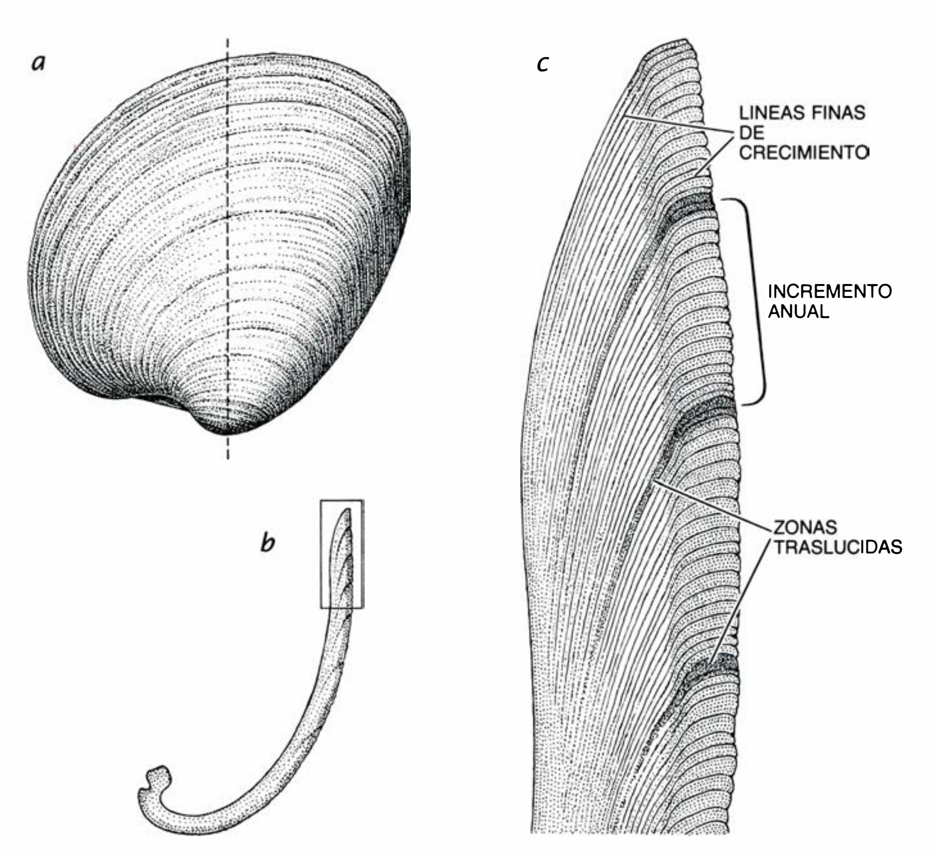


4. PREHISTORIA de la zona oriental de Norteamérica, dividida en períodos asociados a diversos útiles. Los elementos que sirven para fechar los depósitos arqueológicos varían según las regiones; las puntas de piedra mostradas aquí son típicas de la costa de Nueva Inglaterra. El osario proporcionó una punta Levanna, que permite fechar el enterramiento en el período del Bosque tardío; el yacimiento de restos superpuesto, un depósito secundario, contenía un pendiente de láminas de latón, señal de que al menos parte del depósito se abandonó tras el primer contacto con los europeos, que introdujeron ese material.

dío. El análisis demostró que, en todos los períodos prehistóricos, la recolección de moluscos era más intensa en invierno y principios de la primavera.

Las hipótesis de que los nativos viajaban a la costa de Nueva Inglaterra sólo ocasionalmente o siguiendo una pauta estacional dan por supuesta la ocupación estival. Los hallazgos estacionales indican que, cuando menos desde el Arcaico final, la costa estaba habitada en invierno. ¿No es más razonable admitir que vivían allí permanentemente?

Sin embargo, la recolección de moluscos no se prolongaba a lo largo de todo el año, como cabría esperar de una ocupación permanente de la costa; en efecto, el patrón de capturas parecía limitarse cada vez más. En dos de las concentraciones del Arcaico final y del período del Bosque medio, las líneas de crecimiento indican que la recolección de conchas se extendía más allá del invierno y el principio de la primavera hasta el verano. En todos los lugares del período del Bosque tardío, por el contrario, los moluscos parecían haberse recolectado sólo en invierno y principios de la primavera.



5. LINEAS DE CRECIMIENTO de la concha de un bivalvo, que informan sobre la época del año en que se ha recolectado. Durante el invierno crece lentamente y deposita una zona de material traslúcido. Cuando comienza a crecer más deprisa, en febrero o marzo, el material añadido es opaco y los ciclos de crecimiento diario —establecidos por las mareas— se reflejan en finas líneas de desarrollo. A menudo puede determinarse el mes de la muerte seccionando la concha (*a, b*) y contando las líneas del último incremento (*c*).

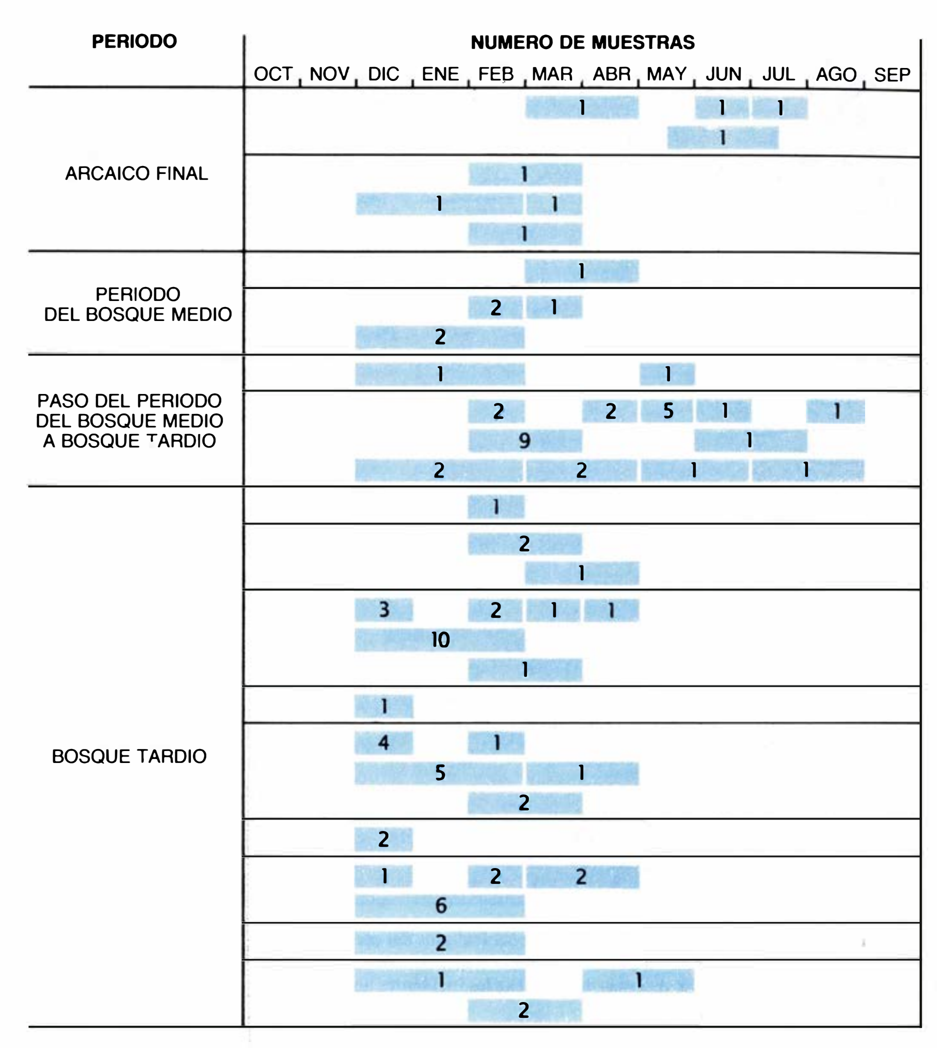
Se desconoce el motivo de esos cambios de organización, que quizás acompañaron al surgimiento de una práctica que identifica a las poblaciones sedentarias: la agricultura. Los relatos sobre la vida de los hurones indican que el cuidado de los campos de grano exigía una dedicación considerable; es más, uno de los primeros estudiosos de la vida de los nativos de Nueva Inglaterra, William Wood, escribió en 1634 que el cuidado del cereal y la recolección de marisco constituían tareas asignadas a la mujer. Presumiblemente, en el período del Bosque tardío la recolección de marisco se limitó a los meses de invierno porque una mayor dedicación a las cosechas, durante el resto del año, dejaba a las mujeres poco tiempo para aquella labor. Además, habría escasez de otros alimentos naturales en invierno.

Las concentraciones de atefactos estudiadas en el Servicio del Parque aportaron pruebas de otro tipo: desde el período del Bosque tardío, y quizá con anterioridad, la zona exterior del Cabo permanecía habitada todo el año. Resulta razonable suponer, y así se ha confirmado en estudios de otras culturas, que cuanto más se prolonga la ocupación de un lugar por parte del grupo, más abundantes son los restos y desechos; asimismo, mientras que los grupos nómadas dejan restos de piedra, huesos de animales y otros desperdicios en el interior del campamento, los sedentarios concentran sus desechos en lugares situados en el límite o más allá de su zona de habitación. Las concentraciones de restos de los grupos sedentarios se denominan depósitos secundarios, para distinguirlos de los dispersos y menos variados depósitos primarios encontrados en las zonas de residencia.

Examinando la densidad de las concentraciones podíamos identificarla

como depósito primario o secundario. Sin embargo, algunos de los depósitos secundarios de mayor densidad estaban compuestos, de manera casi exclusiva, por conchas; optamos, pues, por clasificarlos también en razón de los distintos instrumentos que contenían. Denominamos depósitos generales los que alojaban gran cantidad de por lo menos dos clases de restos (huesos de animales y roca quemada, por ejemplo), y menor proporción de otros tipos de utensilios; los consideramos un importante testimonio de la proximidad de un asentamiento permanente.

Identificamos 17 depósitos generales en la National Seashore. La mayoría procedían del período del Bosque tardío, si bien algunos representaban etapas anteriores al período del Bosque y al Arcaico final. Así, pues, hacia el período del Bosque tardío, si no antes, se había desarrollado, en la zona exterior del Cabo, un sistema cultural que incluía asentamientos permanentes. A juzgar por la localización de las concentraciones de utensilios y otras colecciones, el asentamiento prehistórico fue especialmente denso cerca de la bahía Nauset, en torno al puerto Wellfleet y en el extremo del Cabo, cerca de un risco llamado High Head, a pocos kilómetros del estrecho de Indian.



6. CRONOLOGIA de la recolección de moluscos prehistóricos en la zona exterior del cabo de Cod. Informa sobre el modo de vida de sus habitantes. La tabla muestra las fechas deducidas de las líneas de crecimiento de las conchas de bivalvos encontradas en varios depósitos de utensilios; las cifras indican el número de conchas que pueden asignarse al mes o meses que abarca la barra. A lo largo de la prehistoria, la recogida de moluscos era más intensa en invierno, señal de que la zona exterior del cabo estaba poblada en invierno (y probablemente a lo largo de todo el año). Algunas conchas procedentes de las concentraciones de artefactos más antiguas podrían haberse recogido también en verano; durante el período del Bosque tardío, sin embargo, la recolecta parece haberse limitado a los meses de invierno. Según proponen los autores, el incremento de la horticultura dejaría poco tiempo para la recogida de almejas, de la que se ocupaban las mujeres.

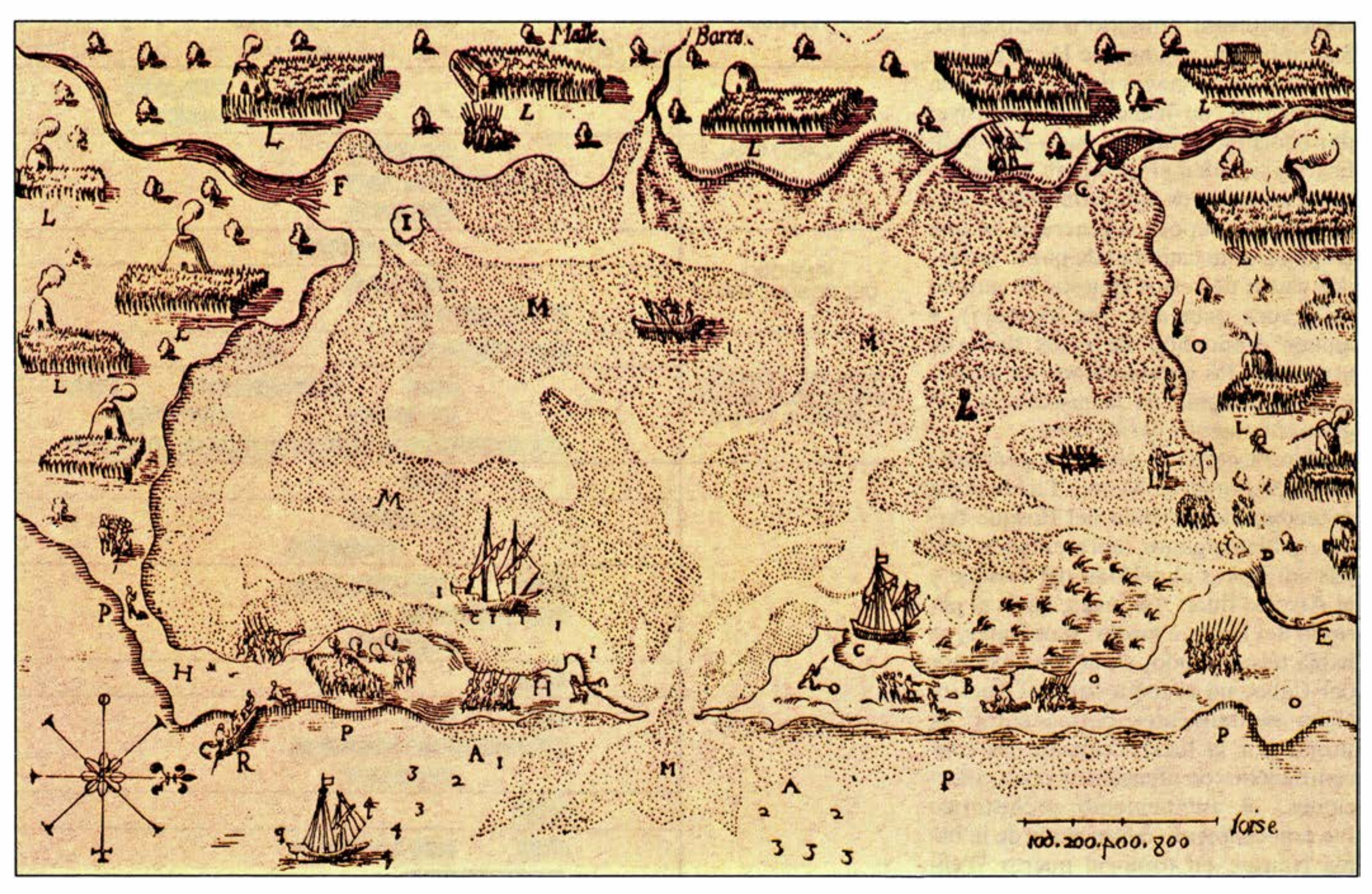
Estas zonas del Cabo fueron las primeras que exploraron los europeos a principios del siglo XVII. Los informes de aquellos primeros visitantes parecen confirmar el testimonio del registro arqueológico y del propio osario. Es cierto que el osario y muchas de las concentraciones de útiles del Servicio del Parque pueden fecharse siglos antes del contacto europeo, pero el estudio de la Comisión Histórica de Massachusetts demostró que el registro arqueológico del Cabo es notablemente coherente, tanto por la variedad de los asentamientos como por su distribución a lo largo del período del Bosque tardío y hasta el período del Contacto. Lo que vieron los primeros europeos probablemente fuera representativo de la pauta de asentamiento de los últimos siglos.

Los primeros informes detallados de que se dispone arrancan de un intento francés de exploración de la costa de Nueva Inglaterra, a principios del verano de 1605. Samuel de Champlain, más tarde conocido como el Padre de la Nueva Francia, era el cartógrafo de la expedición. A finales de julio, los exploradores alcanzaron el extremo meridional del viaje, que había empezado en el río Santa Cruz, en la actual frontera entre Estados Unidos y Canadá. Utilizaron de puerto la bahía Nauset, que Champlain describió como "una bahía con tiendas indias por todo su contorno".

Los franceses regresaron a la bahía de Nauset en otoño de 1606. Hallaron todavía pobladas las costas: al dirigirse el jefe de la expedición a tierra, cuenta Champlain, "se le aproximaron unos 150 indios cantando y danzando según sus costumbres". El relato de Champlain sugiere que los nativos no sólo permanecían en la costa más de una estación, sino que invernaban en ella. En Puerto Stage, unos 30 kilómetros al sur de Nauset, Champlain señala "que todos los habitantes del lugar se dedican por entero a la agricultura y almacenan maíz para el invierno". El grano se guardaba, anota, en pozos excavados en laderas arenosas.

Los siguientes europeos que visitaron la parte exterior del Cabo, los "Padres Peregrinos", observaron pruebas similares de asentamiento permanente. Los Peregrinos se asentaron finalmente en Plymouth, pero más de un mes después de su llegada, en el invierno de 1620, el *Mayflower* atracó en el Puerto de Provincetown, en el extremo del cabo de Cod. Desde allí, los colonos emprendieron tres breves exploraciones por los alrededores para averiguar si el terreno y la existencia de agua potable permitían el asentamiento y si la disposición de los nativos era favorable. Edward Winslow y William Bradford, dos de los jefes de los Peregrinos, relataron lo que vieron.

En su primera exploración, que les llevó más de 15 kilómetros al sur hacia el río Pamet, los Peregrinos atravesaron un paisaje que ofrecía signos de



7. MAPA DE LA BAHIA DE NAUSET según los trabajos del cartógrafo Samuel de Champlain, el "Padre de la Nueva Francia", que visitó la zona exterior del cabo Cod en 1605 y 1606. Además de registrar los incidentes acaecidos durante la exploración francesa, incluidas las luchas con los aborígenes, el mapa representa un paisaje que revela la presencia de una población sedentaria: se distinguen campos de cultivo y el paisaje está salpicado de tiendas indias.

una actividad humana intensa, agricultura incluida. Descubrieron caminos bien trazados y marcados y campos que parecían haber sido limpiados y cultivados recientemente: uno de ellos se extendía unas 20 hectáreas. Observaron otros campos, menores, de maíz que habían sido cultivados aquel mismo año y, cerca de uno de ellos, los restos de una tienda india. Los exploradores encontraron también un silo subterráneo de grano, probablemente de la cosecha del año. Su toma de contacto con el entorno cultural del Nuevo Mundo resultó completo cuando Bradford (el futuro gobernador de la colonia de Plymouth) quedó accidentalmente atrapado en un cepo de ciervos.

En sus incursiones posteriores, los Peregrinos descubrieron tumbas, depósitos de alimentos con cereales, judías y bellotas, campos en barbecho y tiendas vacías, quizás abandonadas al acercarse los exploradores. Particularmente seductor, por lo que respecta al osario, es su informe sobre "un gran cementerio": una empalizada que rodeaba parcialmente un grupo de tumbas, algunas dotadas de techo o rodeadas por empalizadas menores. Sólo al final de su tercera expedición se toparon los Peregrinos cara a cara con los indígenas. Lamentablemente, el encuentro se convirtió en un ataque al campamento de los exploradores y su resultado fue inducirles a buscar otro sitio más hospitalario, que hallaron en Plymouth.

Al igual que Champlain antes que ellos, los Peregrinos ofrecieron en sus descripciones sobre la utilización de la tierra, almacenamiento de alimentos y signos de ocupación invernal la imagen de una cultura completamente asentada. No citan en cambio los densos poblados cercados que habían descubierto los misioneros franceses entre los hurones y los iroqueses, o los complejos de poblado y terraplén que se han excavado en el medio oeste y sur oeste de Estados Unidos. Su ausencia, en los relatos y en el registro arqueológico, sugiere que los asentamientos nativos de la parte exterior del Cabo, aun cuando fueran permanentes, eran pequeños y dispersos —quizás no mayores que los grupos de tiendas indias referidas por los exploradores europeos.

A la luz de la geografía actual del cabo de Cod puede ilustrarse fácilmente cómo se abastecerían los habitantes para subsistir durante el año sin emigrar estacionalmente en busca de comida. Ocupando lugares como el territorio que bordea Nauset Marsh y el puerto Wellfleet, tendrían fácil acceso a un abanico de microentornos: desde llanuras de marinas y salinas hasta zonas húmedas de agua potable y altiplanos boscosos. Ciervos, bellotas, mariscos, aves marinas y otros alimentos naturales, todos en un microentorno particular y en una determinada época del año, contribuirían a su economía. Súmese a ello la horticultura, que probablemente no constituiría la fracción dominante de su dieta.

Al aproximarse el quinto centenario de la llegada de Colón a América, el contacto profundo entre europeos y aborígenes que se inició con su descubrimiento será tema obligado de estudio y fascinación. La comprensión del desarrollo y del resultado del encuentro exige una clara imagen de la cultura nativa precolombina y de sus procesos de adaptación. Creemos que el osario del estrecho de Indian y los análisis históricos y arqueológicos consiguientes han avivado esa imagen del sur de Nueva Inglaterra.

El misterio de la constante cosmológica

De acuerdo con la teoría, la constante que mide la energía del vacío debería ser mucho mayor de lo que es. El conocimiento del motivo de esa discrepancia podría revolucionar los fundamentos de la física

Larry Abbot

¿Qué es lo que determina la estructura del espacio y el tiempo en el universo? De acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein, las propiedades geométricas del espacio están relacionadas con la densidad de energía (y de momento) del universo. Por consiguiente, para comprender la estructura del espacio-tiempo debemos empezar por identificar fuentes de energía que se presuman importantes y ponderar luego su contribución a la densidad total de energía (y de momento). Las fuentes de energía obvias que acuden a nuestra mente son la materia y la radiación. Una fuente de energía bastante menos obvia que puede incidir de una forma decisiva en la estructura del universo es el espacio sin nada, esto es, el vacío.

La idea de que el vacío constituya una fuente de energía va, así parece, contra la intuición. Pero las teorías actuales de las partículas y de las fuerzas elementales no sólo permiten que el vacío adquiera una densidad de energía distinta de cero, sino que sugieren sólidamente que debe tener un valor alto. ¿Es tanta la densidad de energía del vacío como estas teorías parecen indicar?

La respuesta es decididamente negativa. La estructura geométrica del universo se muestra muy sensible al valor de la densidad de energía del vacío. Reviste tanta importancia este valor que se ha definido una constante proporcional a dicha densidad de energía del vacío. Se trata de la constante cosmológica. Si la densidad de energía del vacío o, equivalentemente, la constante cosmológica, adquiriese el alto valor que le atribuyen las teorías de las partículas elementales, el universo donde vivimos sería del todo distinto y tendría unas propiedades que nos parecerían a la vez extrañas y desconcertantes. ¿En qué yerran nuestras teorías? Todavía no lo sabemos. La verdad es que la comparación de nuestros conocimientos teóricos y experimentales acerca de la constante cosmológica nos conduce a uno de los misterios más enredados y frustrantes de la física de partículas y de la teoría de la relatividad de nuestros días.

La mayoría de las personas no están acostumbradas a la idea de que el vacío pueda tener una densidad de energía no nula: ¿cómo es posible que una unidad de volumen de espacio vacío contenga energía? La respuesta se halla, en parte, en el hecho siguiente: de acuerdo con la mecánica cuántica, las magnitudes físicas tienden a fluctuar. Incluso en la aparente quietud del estado vacío, aparecen y desaparecen constantemente pares de partículas. Tales fluctuaciones contribuyen a la energía del vacío.

La noción de una energía del vacío resulta también poco familiar porque se trata de una energía que no puede detectarse mediante técnicas usuales. Generalmente, las energías se determinan midiendo el cambio en la energía de un sistema cuando éste se modifica, o bien midiendo la diferencia de energía que hay entre dos sistemas. Así, por ejemplo, podríamos medir la energía que se produce cuando dos compuestos químicos reaccionan. Debido a ello, la energía, tal como la definimos normalmente, es una magnitud relativa. La energía de cierto estado de un sistema tiene sólo un significado en relación con la de algún otro estado.

Por convenio, las energías se miden a menudo en relación con la del vacío. Cuando se definen de este modo, el vacío tiene automáticamente energía cero en relación consigo mismo. El método tradicional no puede dar resultado, si lo que pretendemos es averiguar la energía del vacío de una manera absoluta y significativa. Deberemos utilizar necesariamente una técnica distinta para determinar su valor.

El único camino para establecer una medida absoluta de la energía es hacer uso de la gravedad. En la teoría de la relatividad general, la energía constituye la fuente de los campos gravitatorios, del mismo modo que la carga eléctrica es la fuente de los campos eléctricos en la teoría de Maxwell sobre el electromagnetismo. Una densidad de energía de cualquier tipo, incluida la que se produce por fluctuaciones del vacío, genera un campo gravitatorio que se muestra, a su vez, en forma de un cambio de la geometría del espacio-tiempo. Así, por ejemplo, el campo gravitatorio de la Tierra está producido por su energía en reposo, que es igual a la masa de la Tierra multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (según nos dice la famosa fórmula $E = mc^2$). El campo gravitatorio produce una pequeña distorsión en la geometría del espacio-tiempo cerca de la Tierra, lo que se traduce en la fuerza que nos atrae a todos hacia el suelo. En la teoría de la relatividad general, la densi-

1. UN UNIVERSO con una constante cosmológica elevada sería muy distinto del que observamos. El artista ha recreado la situación que se produciría si dicha constante adquiriese el valor que las estimaciones teóricas le asignan. La ilustración está basada en un valor positivo de la constante cifrado en 1/(1 kilómetro)^2. Para un valor así, la estructura del espacio se hallaría tan distorsionada que la radiación procedente de objetos distantes estaría notablemente corrida hacia el rojo, es decir, hacia longitudes de onda más largas. Cuanto más alejado del observador se encontrara un objeto, tanto mayor sería el corrimiento hacia el rojo. Un objeto espectralmente azul situado a un kilómetro de distancia lo veríamos rojo; los objetos situados a más de un kilómetro de distancia de nosotros mostraría tal corrimiento hacia el rojo que resultarían invisibles.


1 KM
3/4 KM
1/2 KM
1/4 KM
0 KILOMETROS (KM)

CONSTANTE COSMOLOGICA =
= $8\pi G/c^4$ × DENSIDAD DE ENERGIA DEL VACIO

G simboliza aquí la constante gravitatoria de Newton; *c*, la velocidad de la luz. Definida así, las unidades de la constante cosmológica son de la forma 1 dividido por el cuadrado de la distancia.

dad de energía del vacío tiene un significado absoluto y puede determinarse midiendo el campo gravitatorio producido, no ya por la materia, sino por el propio vacío.

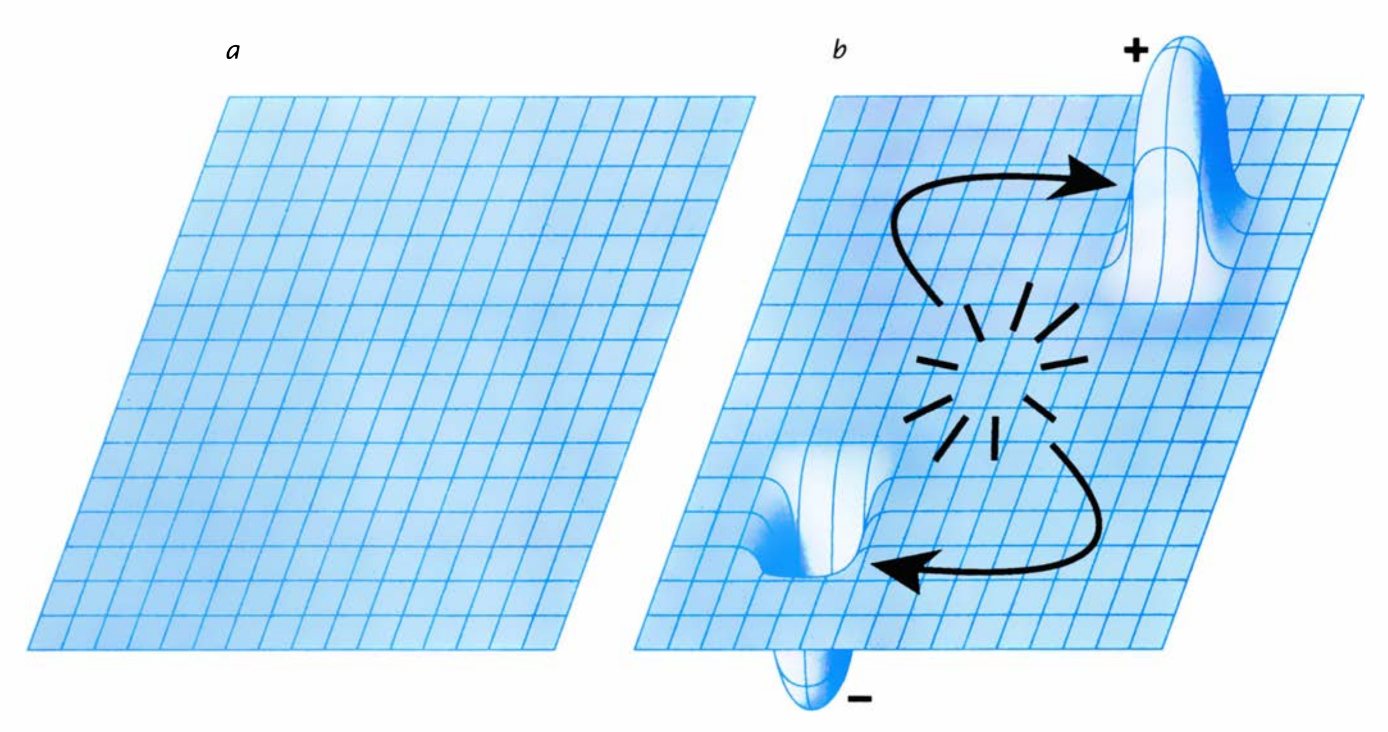
Establecer la densidad de energía del vacío es lo mismo que determinar la constante cosmológica: una es proporcional a la otra. Ahora bien, a la constante cosmológica se le pueden asignar unidades del inverso de la distancia al cuadrado. En otras palabras, la raíz cuadrada del recíproco de la constante cosmológica es una distancia. Esta distancia encierra un significado físico inmediato. Es la escala de longitud para la cual los efectos gravitatorios de una densidad de energía del vacío no nula incidirían de una manera obvia y visible en la geometría del espacio y el tiempo. Podríamos medir el valor de la constante cosmológica a través del estudio de las propiedades geométricas del universo a escalas de longitud del orden de esa distancia.

Los físicos han venido ocupándose de la constante cosmológica desde hace más de 70 años. Introducida por Einstein en 1917, pretendía con ella eliminar dos "problemas" que aparecían en su formulación original de la teoría de la relatividad general. Creyó, por una parte, que, sin una constante cosmológica, la teoría general no podía dar cuenta de un universo homogéneo e isótropo: aquel que se nos aparece del mismo modo desde cualquier posición. No deja de ser curioso que Einstein se ocupase ya de esa cuestión en 1917, cuando no había todavía ninguna prueba de un universo homogéneo e isótropo, extremo que se comprobaría más tarde. Pero la argumentación einsteniana resultó incorrecta. En 1922, Alexander A. Friedmann demostró que la teoría general permite la existencia de un universo homogéneo e isótropo, aunque no estático: el universo debe estar expandiéndose (o contrayéndose). Observaciones astronómicas subsiguientes corroboraron de forma fiable que los modelos basados en el trabajo de Friedmann describían con exactitud la macroestructura del universo.

Einstein hallaba otro motivo de insatisfacción en su formulación original debido a que dicha teoría no proporcionaba una explicación convincente de la inercia. Creyó que, añadiendo una constante cosmológica, lograría elaborar una teoría capaz de relacionar de un modo directo las propiedades inerciales de la materia con la distribución de energía y momento del universo, en línea con lo sugerido por el físico y filósofo austríaco Ernst Mach. Esta esperanza se desvaneció poco después de la publicación del trabajo de Einstein, a raíz de una explicación original del físico holandes Willem de Sitter, que descubrió el modelo de espacio-tiempo que más adelante examinaremos.

Después de un comienzo tan ignominioso no debe sorprendernos el enojo de Einstein en 1923: "fuera el término cosmológico", escribió, quizá con un deje de amargura. Pero, lo veremos, no fue tan sencillo eliminar la constante cosmológica; más aún, ha pervivido para convertirse en la frustración de muchos físicos teóricos. En opinión de George Gamow, Einstein creía que "la introducción del término cosmológico fue el mayor desacierto que cometió en toda su vida", pero una vez introducida ya por Einstein "la constante cosmológica... levanta su horrible cabeza una y otra vez".

Parece que hoy nos hallamos en una situación excelente para abordar la cuestión de la constante cosmológica, pues contamos con una de las teorías físicas de más éxito jamás construidas, a saber, el modelo estándar. Recibe el nombre de modelo estándar un conjunto de teorías que describen con éxito las partículas elementales conocidas y las interacciones entre las mismas. La capacidad del modelo estándar para interpretar y predecir los resultados de múltiples experimentos de la física de



2. FLUCTUACIONES CUANTICAS Y SU CONTRIBUCION al valor de la densidad de energía del vacío (*a*). De acuerdo con la mecánica cuántica, los valores de las magnitudes físicas tienden inevitablemente a fluctuar. A consecuencia de ello, en el vacío pueden aparecer, de forma espontánea, pares de las

partículas no tiene rival (al menos, hasta las energías más altas que resultan accesibles en los actuales aceleradores de partículas).

El modelo estándar es una teoría cuántica de campos. Significa ello que, para cada tipo de partícula fundamental de la naturaleza, existe el correspondiente campo en el modelo y se usa para describir las propiedades e interacciones de la partícula. En el modelo estándar hay, pues, un campo para el electrón, un campo para el fotón (el campo electromagnético) y un campo para cada partícula conocida.

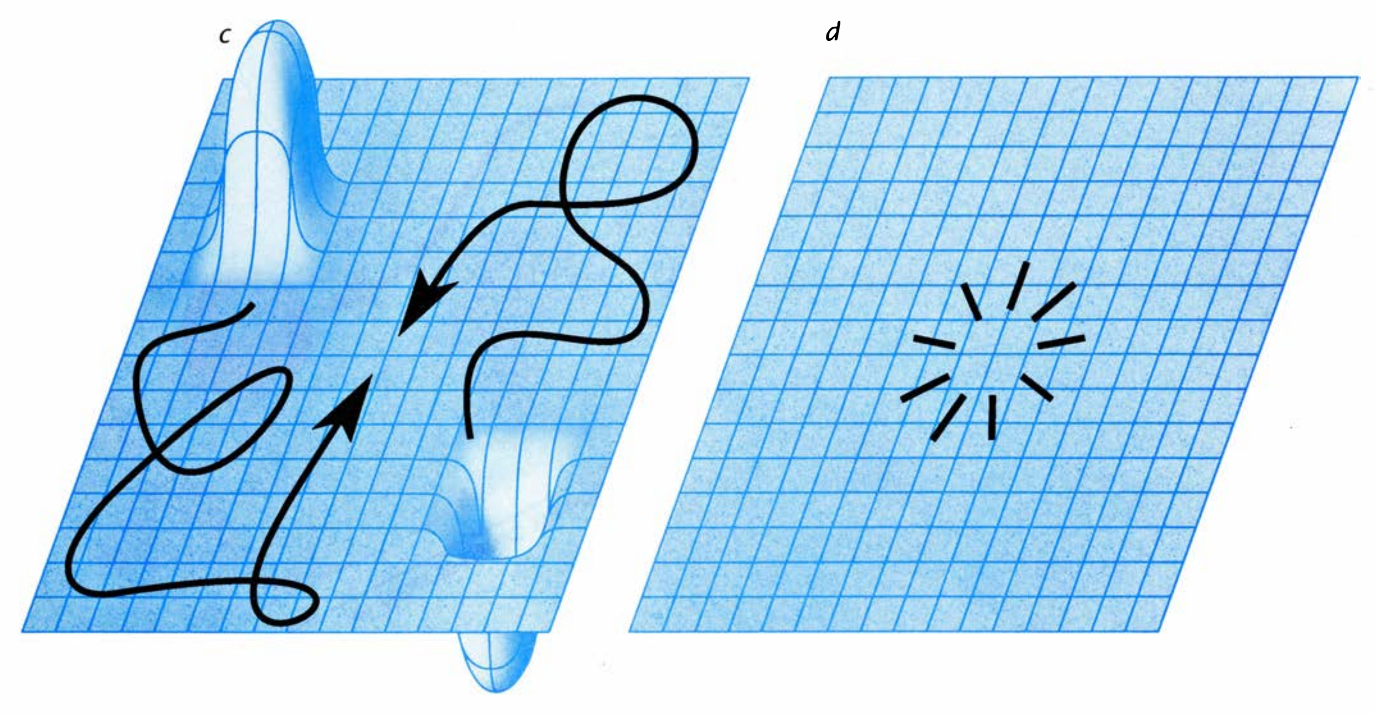
El modelo estándar depende de un número bastante grande de parámetros libres: números que deben determinarse mediante experimentos y sustentarse en la teoría antes de que ésta nos pueda proporcionar predicciones definidas. Entre los ejemplos de parámetros libres citemos los valores de las masas de las partículas y los números que caracterizan las intensidades de sus interacciones mutuas. Una vez establecidos estos números, podemos recurrir al modelo para predecir los resultados de nuevos experimentos, y éstos servirán, luego, para comprobar tales predicciones. La historia corrobora el éxito espectacular de estas comprobaciones.

Los parámetros libres del modelo estándar desempeñarán un papel fundamental en nuestro artículo. A pesar de los muchos éxitos del modelo estándar, su dependencia de un número tan alto de parámetros libres limita seriamente su poder predictivo. Así, por ejemplo, predice la existencia de una partícula adicional, el quark cima ("top"), pero es incapaz de proporcionarnos un valor para su masa, puesto que ésta es otro parámetro libre de la teoría. La física de partículas tiene ante sí el reto formidable de desarrollar una teoría más potente, basada en un número menor de parámetros libres, que incorpore todos los éxitos del modelo estándar. Una teoría, por consiguiente, capaz de determinar los valores de algunos parámetros que no pueden predecirse con el modelo estándar. En la búsqueda de la misma, los físicos investigan sin pausa ni tregua las relaciones entre los parámetros del modelo estándar que pudiesen revelar una estructura más profunda. Como veremos, la constante cosmológica nos proporciona una relación de ésas, aunque aquí nos encontraremos con la sorpresa de hallar más de lo que andábamos buscando.

Igual que en toda teoría cuántica de campos, el vacío se define en el modelo estándar como el estado de menor energía; expresado con mayor propiedad, constituye el estado de mínima densidad de energía. Ahora bien, esto no implica que la densidad de energía del vacío sea cero. La densidad de energía puede ser positiva, negativa o nula, de acuerdo con los valores de varios parámetros de la teoría. Con independencia del valor que tenga, son muchos y complejos los procesos que contribuyen al valor total de la densidad de energía del vacío.

La densidad de energía total del vacío es básicamente la suma de tres tipos de términos. En primer lugar está la constante cosmológica sin más: el valor que tendría dicha constante si no existiese ninguna de las partículas conocidas y si la única fuerza del universo fuese la gravedad. La constante cosmológica "sin más" es un parámetro libre que sólo puede determinarse experimentalmente a través de la medición del verdadero valor de la constante cosmológica.

El segundo tipo de contribución a la densidad total de energía del vacío surge, en parte, de las fluctuaciones cuánticas. Los campos del modelo estándar, como el campo del electrón, experimentan fluctuaciones incluso en el vacío. Tales fluctuaciones se manifiestan en forma de pares de partículas virtuales, que aparecen espontáneamente, interaccionan durante un breve instante y luego desaparecen. (Cada par de partículas virtuales consta de una partícula y de su correspondiente antipartícula: electrón y positrón, por ejemplo, que tienen masas idénticas y cargas eléctricas opuestas.) Aunque las partículas virtuales no pueden detectarse mediante una ojeada casual al espacio vacío, ejercen un influjo mensurable en física; contribuyen, en particular, a la densidad de energía del vacío. El papel de las fluctuaciones del vacío en el modelo estándar depende, a través de una vía muy complicada, de las masas y de las intensidades de interacción entre todas las partículas conocidas.



llamadas partículas virtuales (*b*), que interaccionan brevemente (*c*) para luego desaparecer (*d*). Dibujamos en estas dos páginas las fluctuaciones de una manera abstracta y simbólica. Cada par de partículas virtuales está formado por una partícula y su correspondiente antipartícula. (Dibujos de Joe Lertola.)

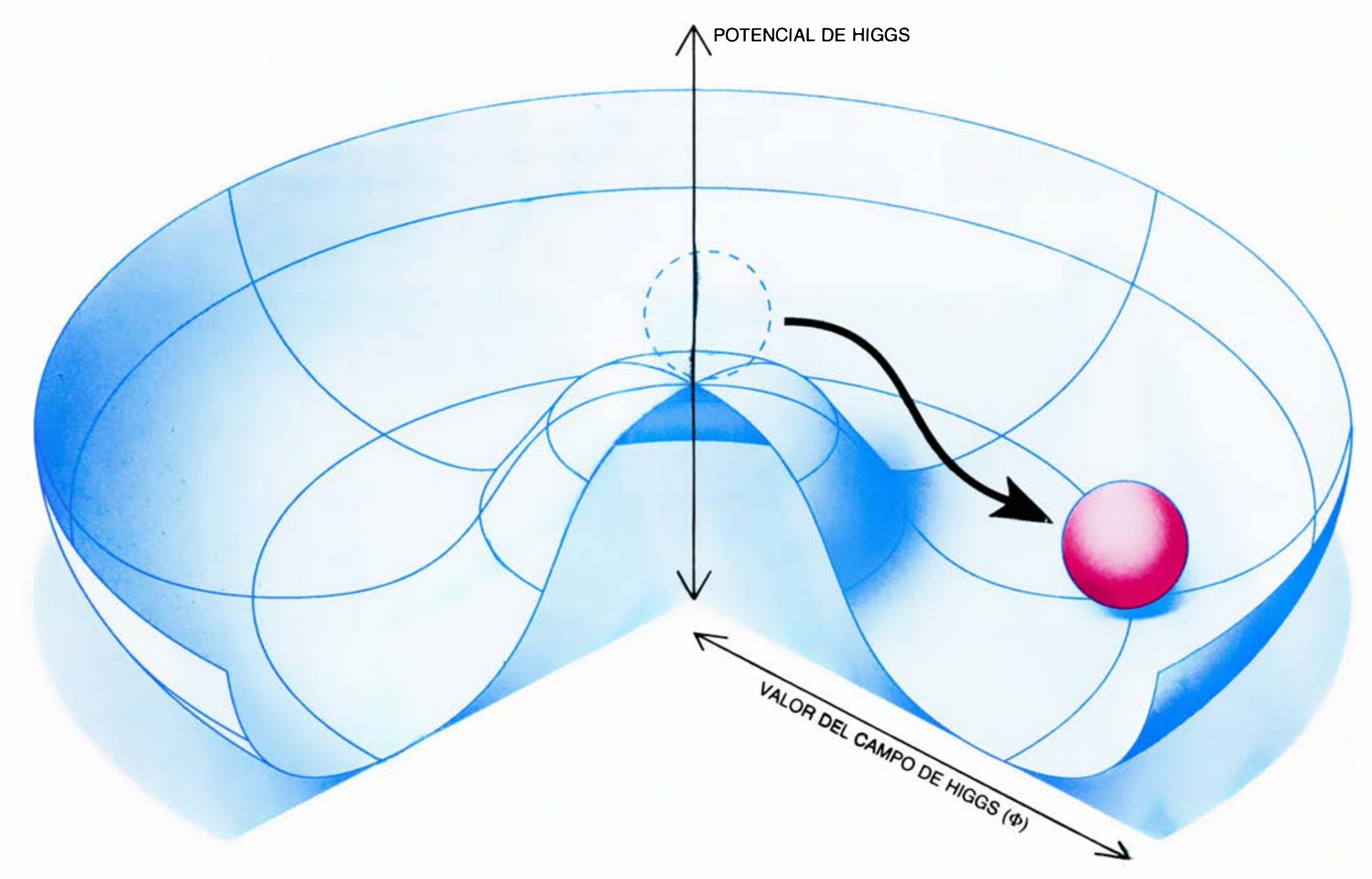
El segundo tipo depende también de un campo adicional, por lo menos; me refiero al campo de Higgs, que representa una partícula dotada de masa, el bosón de Higgs, todavía por detectar. El campo de Higgs debería ejercer un efecto drástico sobre la densidad de energía del estado vacío [véase "El bosón de Higgs", por Martinus J.G. Veltman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987].

El último término a incluir es, a grandes rasgos, un factor de tamaño, que representa las aportaciones a la densidad de energía del vacío debidas a todo tipo de partículas e interacciones adicionales que podrían existir, aunque las ignoremos todavía. Ni que decir tiene que el valor de este término es desconocido.

La constante cosmológica se determina sumando los tres términos mencionados. Nuestra capacidad de predecir su valor siguiendo el modelo estándar se ve frustrada por la existencia de la constante cosmológica "sin más" —parámetro libre que sólo puede determinarse realizando la propia medición que estamos intentando predecir— y por la sensibilidad de la energía del vacío ante la física que todavía desconocemos. Pero no todo está perdido de antemano. Pese a que todos los términos que intervienen en el cálculo de la constante cosmológica dependen, a través de una vía compleja, de los parámetros del modelo estándar, los valores de muchos de estos términos pueden estimarse de modo bastante aproximado. Los constituyentes de protones y neutrones, los quarks "arriba" (up) y "abajo" (down), contribuyen, en una cuantía aproximada de $1/(1\ \text{kilómetro})^2$, al valor de la constante cosmológica, mientras que el campo de Higgs contribuye en una cantidad aún mayor, aproximadamente igual a $1/(10\ \text{centímetros})^2$.

Cada término que contribuye a la constante cosmológica depende de los parámetros del modelo estándar de una manera distinta e independiente. Si suponemos que los parámetros del modelo estándar son libres e independientes (hipótesis que estamos comprobando continuamente en nuestra búsqueda de una estructura más profunda), parece muy improbable que estos términos sin relación mutua conocida puedan cancelarse unos con otros. En consecuencia, cabe suponer que la constante cosmológica total será, al menos, de la magnitud de los distintos términos que podemos calcular. Ahora bien, esta suerte de razonamiento, demasiado general, no permite predecir si la constante cosmológica será positiva o negativa; aunque sí podemos estimar, desde un planteamiento prudente, que su magnitud será, por lo menos, de $1/(1\ \text{kilómetro})^2$, y suponer que podría muy bien cifrarse en $1/(10\ \text{centímetros})^2$, o incluso más. En otras palabras, esperamos que los efectos gravitatorios de una densidad de energía del vacío no nula se manifiesten en forma de distorsiones de la geometría del espacio-tiempo a distancias de un kilómetro o menos tal vez.

No se requiere ningún tipo de experimentación refinada para mostrar que el cálculo teórico precedente es completamente erróneo. Todos sabemos que la geometría euclídea ordinaria proporciona una descripción adecuada del espacio en distancias superiores al kilómetro. Al dar una vuelta alrededor de una manzana de casas, ninguno de nosotros ha observado jamás graves distorsiones de la estructura del espacio-tiempo de nuestro vecindario. Si la magnitud de la constante cosmo-



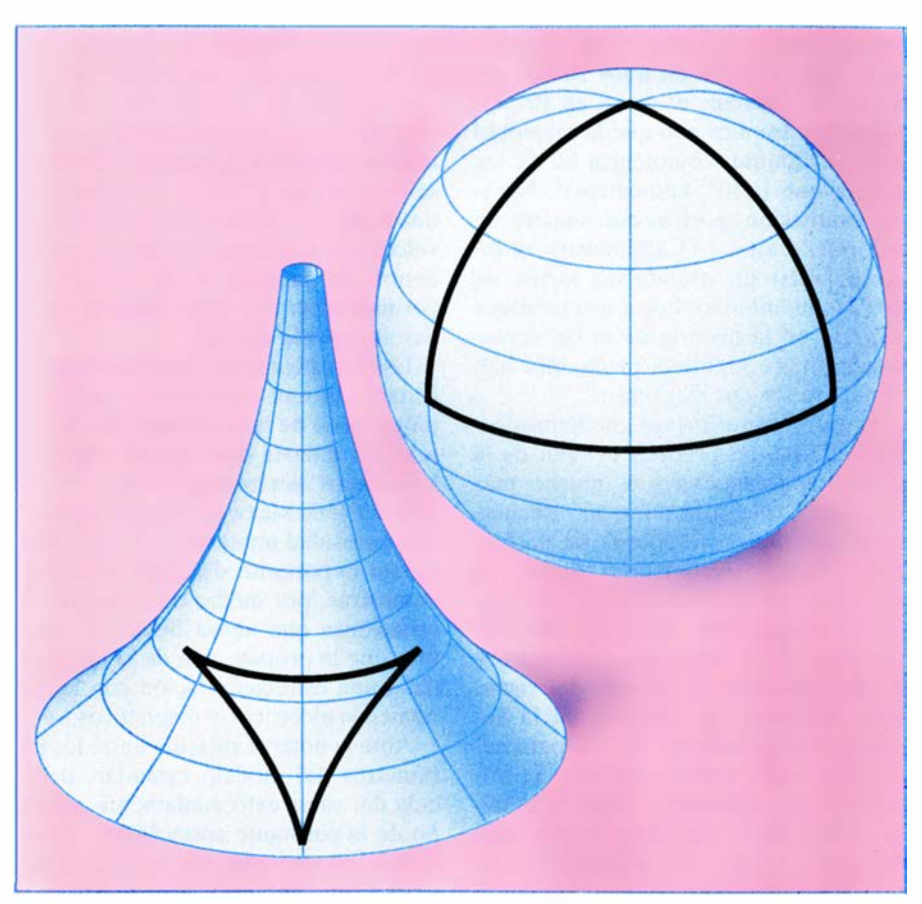
3. SI EXISTE, EL CAMPO DE HIGGS intervendrá de manera decisiva en la densidad de energía del vacío. Se supone que el campo de Higgs corresponde al bosón de Higgs, partícula que, a su vez, originaría las masas de las partículas. Se representa aquí el potencial de Higgs –la parte de la densidad de energía del vacío que depende del valor del campo de Higgs– en función del valor del campo, Φ. Aunque el potencial de Higgs es completamente simétrico con respecto al eje vertical, el vacío debe romper la simetría optando por cierta posición en el fondo de la depresión (*la bola*). Tal selección equivale a la rotura espontánea de simetría y desempeña un papel crucial en el modelo estándar, es decir, en la teoría unificada que describe las partículas elementales y sus interacciones fundamentales.

lógica fuese tan grande como se estima a partir del modelo estándar, la geometría euclídea ordinaria no sería válida en escalas de distancia de un kilómetro, o incluso inferiores. Si la constante cosmológica fuese negativa, con un valor de 1/(1 kilómetro)^2, la suma de los ángulos de un triángulo de lados del orden de un kilómetro sería apreciablemente inferior a los 180 grados y el volumen de una esfera de un kilómetro de radio sería significativamente mayor que $4\pi/3$ kilómetros cúbicos.

Una constante cosmológica positiva del orden de 1/(1 kilómetro)^2 tendría consecuencias más extrañas todavía. Si la constante cosmológica fuese tan grande, no seríamos capaces de percibir otros objetos que los que estuviesen sólo a unos pocos kilómetros de nosotros, debido a las tremendas distorsiones de la estructura del espacio-tiempo. Además, si nos alejásemos de nuestra casa algo más de unos pocos kilómetros, para ver algo del resto del mundo, la distorsión gravitatoria del espacio-tiempo sería tal que no nos permitiría nunca nuestro regreso a casa, por mucho que lo intentásemos.

¿Qué ocurriría si la constante cosmológica fuese distinta de cero, aunque suficientemente pequeña? En este caso, tendríamos que mirar a grandes distancias para apreciar sus efectos sobre la estructura del espacio-tiempo. Naturalmente, nos es imposible trazar triángulos del tamaño del universo y medir sus ángulos, pero sí podemos observar las posiciones y movimientos de galaxias muy lejanas. Mediante la anotación cuidadosa de la distribución y las velocidades de las galaxias lejanas, los astrónomos deducen la estructura geométrica del espacio-tiempo en el que ellos mismos existen y se mueven.

Desde hace ya mucho tiempo, se ha llegado a la conclusión de que la fuente dominante de distorsión gravitatoria de la geometría del espacio-tiempo del universo a grandes escalas parece ser la densidad de energía de la materia, y no la del vacío. Aunque ambas, la densidad de energía de la materia y la del vacío, condicionan la estructura geométrica del universo, lo hacen de manera diferente y distinguible. Numerosas observaciones han demostrado que las galaxias del universo se mueven, alejándose unas de otras, hecho que se cuenta entre los más relevantes dentro de la teoría de la gran explosión ("big bang") del universo y su expansión, teoría corrientemente aceptada en cosmología. La atracción gravitatoria ordinaria entre galaxias tiende a frenar esta expansión. A medida que las galaxias se alejan unas de otras, su atracción gravitatoria se va debilitando; de este modo, el ritmo al que la expansión se va frenando disminuye con el tiempo. Así, pues, el efecto de la materia ordinaria sobre la expansión del universo es el de decelerar dicha expansión a un ritmo cada vez menor.



4. DISTORSIONES DE LA GEOMETRIA producidas por una constante cosmológica no nula. Esas deformaciones pueden afectar al espacio y al tiempo. Se muestra aquí el efecto sobre la geometría espacial, suponiendo que las distorsiones sean independientes del tiempo. Una constante cosmológica negativa daría lugar a un espacio con curvatura constante negativa (*izquierda*); una constante positiva produciría una curvatura constante positiva (*derecha*). En un espacio con curvatura negativa, la suma de los ángulos de un triángulo sería menor que 180 grados; con una curvatura positiva, la suma sería mayor que 180 grados.

¿Cuáles serían los efectos de una constante cosmológica no nula sobre el ritmo de expansión del universo? Una constante cosmológica negativa tendería a frenar la expansión de las galaxias, a un ritmo siempre constante que no disminuiría con el tiempo. Por el contrario, una constante cosmológica positiva haría que las galaxias tendiesen a acelerar su mutuo alejamiento aumentando el ritmo de expansión del universo. Los estudios detallados de los ritmos de expansión de las galaxias lejanas no muestran ningún indicio en favor de una constante cosmológica, ni positivo ni negativo.

Un buen ejemplo de cómo los astrónomos miden la geometría del universo y buscan constantes cosmológicas no nulas lo encontramos en un trabajo reciente de Edwin D. Loh y Earl J. Spillar, de la Universidad de Princeton. En su observación contaron el número de galaxias situadas dentro de regiones de tamaño específico en diversos lugares del espacio. Si suponemos que, en promedio, el número de galaxias por unidad de volumen es el mismo en todas partes, al contar las galaxias que se hallan en cierta región estamos estimando el volumen de la misma. Midiendo volúmenes de regiones alejadas de nosotros, estamos determinando la relación entre distancia y volumen a escalas muy grandes y a tiempos muy remotos, dado que la luz de las galaxias lejanas tarda mucho tiempo en llegar hasta nosotros —miles de millones de años en el caso de esta observación.

A pesar de que las observaciones de este tipo contienen muchas y sutiles fuentes potenciales de error, los resultados difieren de un modo asombrosamente drástico de nuestra estimación teórica; hasta el punto de que errores de un factor dos e incluso diez resultan insignificantes. Todas las observaciones galácticas están de acuerdo en que no hay ninguna prueba de distorsiones del espacio-tiempo debidas a una constante cosmológica no nula; afirmación que es válida incluso para las distancias

más lejanas y accesibles a los astrónomos, que se cifran en unos 10.000 millones de años luz, es decir, en 10^{23} kilómetros. Implica ello que la magnitud de la constante cosmológica ha de ser menor que $1/(10^{23}$ kilómetros$)^2$. Nuestra estimación teórica, que sugiere un valor superior a $1/(1$ kilómetro$)^2$ es incorrecta en un asombroso factor de 10^{46}, como mínimo. Pocas estimaciones teóricas en la historia de la física realizadas sobre hipótesis razonables han resultado ser tan inexactas.

El estrepitoso fracaso que hemos sufrido al intentar predecir el valor de la constante cosmológica es mucho más que un simple contratiempo. Recuérdese que nuestra hipótesis de partida para obtener la estimación consiste en suponer que no se producían cancelaciones inesperadas entre los diversos términos de la suma que determinaba la densidad total de energía del vacío. Esta esperanza se fundaba en la supuesta independencia de los parámetros libres del modelo estándar. Se trataba de una hipótesis a todas luces falsa. Debe haber una conspiración, casi milagrosa, entre los parámetros, conocidos e ignorados, que gobiernan la física de partículas, de suerte que los términos que intervienen en la constante cosmológica se aniquilen entre sí y la suma total sea una cantidad 46 órdenes de magnitud menor que la de los distintos factores de la suma. En otras palabras, ese valor tan pequeño de la constante cosmológica nos está diciendo que existe una relación muy precisa y totalmente inesperada entre todos los parámetros del modelo estándar, la constante cosmológica "sin más" y la física aún desconocida.

Una relación entre los parámetros libres del modelo estándar es lo que estamos buscando en nuestro afán por descubrir teorías más profundas y predictivas. ¿Cómo aparece una relación tan compleja entre lo que en un principio creíamos parámetros libres, sin ligaduras de ningún tipo? ¿Qué significado encierra?

Para responder a estas preguntas convendrá traer a colación dos ejemplos extraídos de la historia de la física. A mediados del siglo XIX se había medido ya la velocidad de la luz y había teorías que describían los fenómenos eléctricos y magnéticos; sin embargo, no se había demostrado todavía que la propagación de la luz fuese un efecto electromagnético. Pero varios físicos se dieron cuenta de una curiosa relación entre la velocidad de la luz y dos parámetros que intervienen en las ecuaciones de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Usando la notación moderna, lo que ellos observaron fue que la constante de permisividad electromagnética ϵ_0 y la constante de permeabilidad magnética μ_0 podían combinarse en la forma $\sqrt{1/\mu_0\epsilon_0}$, y suministrar una magnitud numéricamente igual a la velocidad medida para la luz (al menos, dentro del margen de los errores experimentales, que eran bastante grandes en aquella época).

Los investigadores apreciaron que se trataba de una coincidencia numérica milagrosa o de la manifestación de una relación todavía desconocida entre los fenómenos electromagnéticos y la luz. James Clerk Maxwell conocía también esa curiosidad numérica, y la usó como fuente importante de inspiración para demostrar, por medio del conjunto de ecuaciones que ahora llevan su nombre, que la propagación de la luz guardaba una estrecha relación con los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Ante la notable relación entre los parámetros del modelo estándar, deducida del valor extremadamente pequeño de la constante cosmológica, ¿cabe pensar en que una maravillosa teoría unificadora nos está aguardando a la vuelta de la esquina? No nos precipitemos. Veamos otro ejemplo, sacado esta vez de la historia de la teoría electromagnética.

En cuanto Maxwell incorporó la propagación de la luz en la teoría electroagnética, comenzó a admitirse que las ondas luminosas viajaban a través de un medio que recibía el nombre de éter. Haciendo uso de un interferómetro, Albert A. Michelson y Edward W. Morley se aprestaron a medir la velocidad de la Tierra en su movimiento a través del éter. Encontraron que la velocidad relativa era cero: la velocidad de la Tierra y la velocidad del éter eran idénticas. Es ésta otra relación que involucraba lo que entonces se creía otro parámetro fundamental de la naturaleza: la velocidad del éter. Pero, ¿mostró este descubrimiento el camino hacia una teoría unificada que relacionase una propiedad fundamental del electromagnetismo con el movimiento de la Tierra?

Aunque se avanzó la idea de que el éter se desplazaba con la Tierra, el resultado nulo del experimento de Michelson-Morley se explica hoy apelando a la teoría especial de la relatividad de Einstein, la cual demostró que la concepción del éter que se utilizaba entonces era incoherente con las simetrías del espacio y del tiempo. Ninguna teoría que porporcionase una relación fundamental entre la velocidad del éter y algo tan peculiar como la velocidad de la Tierra ha persistido. No debe sorprendernos. La velocidad de la Tierra está afectada por muchos fenómenos —la forma y el tamaño de su órbita alrededor del Sol, la masa del Sol y el movimiento de éste en la galaxia, por ejemplo—, los cuales no parecen estar en absoluto relacionados con los fenómenos de la teoría del electromagnetismo. No se defiende ya ninguna relación fundamental entre la velocidad del éter y la velocidad de la Tierra, entre otras razones porque el propio éter, tal como lo imaginaban los teóricos del siglo XIX, ni siquiera existe.

En ambos ejemplos, una relación sorprendente entre distintos parámetros de la naturaleza trajo consigo descubrimientos nuevos, drásticos y revolucionarios. Hay razones sobradas para creer que la misteriosa relación escondida tras el valor, pequeñísimo, de la constante cosmológica indica que quedan todavía por llevar a cabo importantes descubrimientos. Los dos ejemplos que hemos considerado son muy diferentes. La primera relación, en la que intervienen dos parámetros provenientes del electromagnetismo y uno de la propagación de la luz, es lo que los físicos denominarían hoy una relación "natural", es decir, una relación que involucra un pequeño número de parámetros conocidos. La existencia de una relación natural puede indicar la existencia de una teoría unificadora y, lo que reviste interés, sugiere que tal teoría puede llegar a descubrirse.

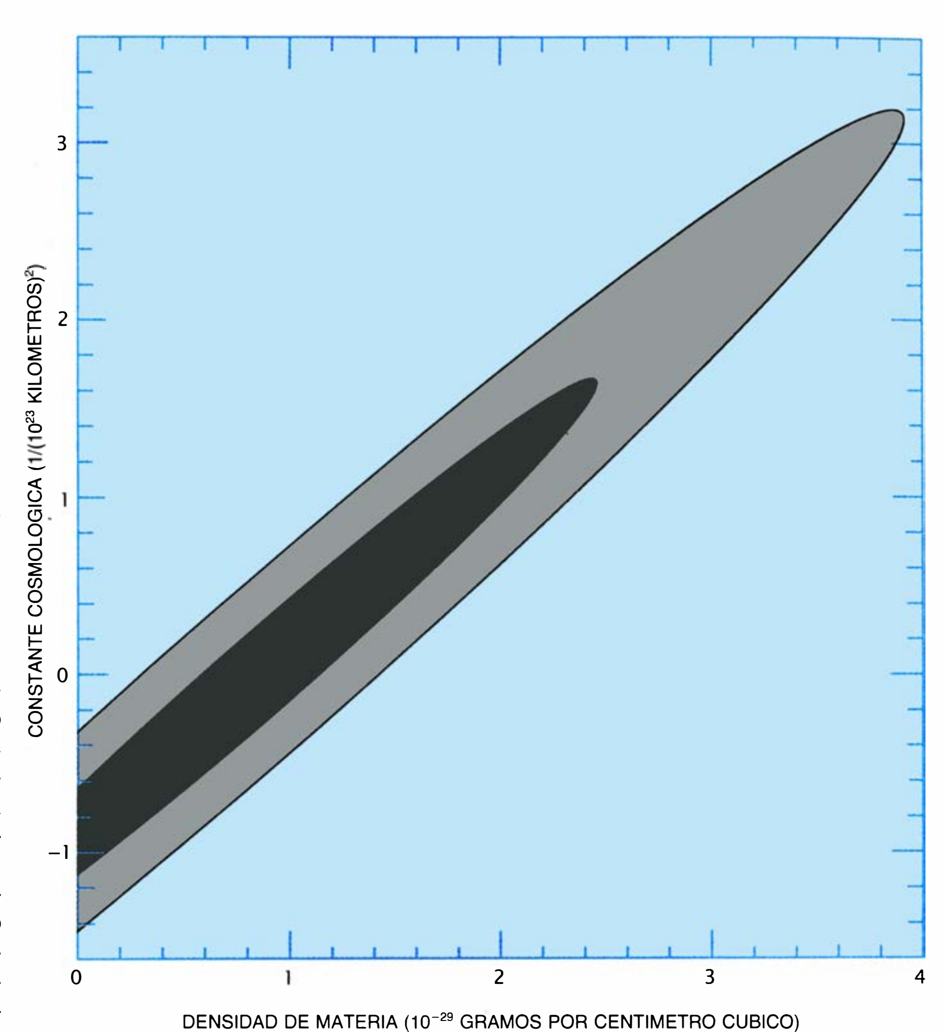
El segundo ejemplo, en el que la velocidad del éter se relacionó con la velocidad de la Tierra, es lo que hoy llamaríamos una relación "no natural", es decir, una relación que involucra muchos parámetros, desconocidos algunos de ellos, si no imposibles de conocer. Parece improbable, por ejemplo, que podamos averiguar jamás, y comprender, los numerosísimos factores que determinan el valor de la velocidad de la Tierra en relación a las galaxias lejanas. Cualquier teoría unificada que pretenda dar cuenta de una relación no natural tendría que explicar simultáneamente los valores de muchos parámetros, conocidos o ignorados. Parece muy poco probable que una teoría de este tipo pueda hallarse nunca, aun cuando existiera en realidad.

Nuestro ejemplo indica que una relación no natural sugiere la existencia de una profunda falta de comprensión de la esencia de lo que se está midiendo y relacionando, y no precisamente la existencia de una teoría unificadora subyacente. En consecuencia, una re-

lación no natural puede señalar el advenimiento de una revolución en nuestro marco teórico más drástica que la que señalaría una relación natural.

Si dejamos de lado la posibilidad de que ese mínimo valor de la constante cosmológica sea accidental, debemos aceptar que posee profundas implicaciones en física. Sin embargo, antes de embarcarnos en la construcción de nuevos modelos unificados, conviene abordar el hecho de que la relación implicada por la anulación de la constante cosmológica sea no natural. Las cancelaciones milagrosas requeridas para producir una constante cosmológica aceptablemente pequeña dependen de todos los parámetros relevantes de la física de partículas, conocidos o desconocidos. Para predecir un valor cero (o pequeño) de la constante cosmológica, toda teoría unificada habría de empezar por dar cuenta, uno por uno, de todos los parámetros que afectan a la física de partículas. Una tarea nada despreciable. Y lo que es aún peor, para obtener una constante cosmológica lo suficientemente pequeña, son necesarias cancelaciones de finísima precisión (de una parte en 10^{46} o más); la teoría debería predecir los parámetros con una exactitud extraordinaria antes de lograr una mejora, siquiera mínima, en la situación que concierne a la constante cosmológica. La construcción de tal teoría, aun cuando existiera (lo que no está claro), constituye una labor de titanes, por no decir imposible.

Se han propuesto algunas teorías para resolver este problema; por ejemplo, las del tipo de las de la "corriente de éter". Pero la mayoría de los esfuerzos empeñados en la constante cosmológica se centran, hoy, en descubrir el error subyacente, la pieza que falta en el modelo estándar o el sesgo equivocado en la concepción del vacío, elemento que, una vez acotado, desharía el problema o lo convertiría, al menos, en otro de tipo natural. Mientras el problema de la constante cosmológica siga siendo no natural, la única esperanza de solución reside en idear una teoría que lo contenga todo, capaz de dar cuenta de todos los parámetros de la física de partículas con una exactitud casi perfecta. Si podemos cambiar la relación requerida para producir una densidad de energía del vacío aceptablemente pequeña, convirtiéndola en otra natural, entonces, aunque no hayamos podido todavía determinar su valor, habremos reducido el problema de la constante cosmológica a otro problema más manejable, que sólo comprometerá un número razonable de parámetros conocidos, para los cuales bastará una predicción con un grado de exactitud moderado. De momento son pobres los resultados conseguidos en el empeño. A pesar de una gran inversión en trabajo y creación teórica, seguimos sin saber por qué la constante cosmológica es tan pequeña.



5. SE HA INVESTIGADO LA CONSTANTE COSMOLOGICA contando el número de galaxias que se hallan en diversas regiones del universo y determinando, a partir de ello, la geometría de esas regiones. Las representaciones gráficas de los resultados permiten ciertos valores de la constante cosmológica en función de la densidad de materia del universo. (El área en negro corresponde a valores permitidos con un nivel de confianza del 67 por ciento; el área en gris es la región de nivel de confianza del 95 por ciento.) Las unidades son aproximadas, si bien la gráfica muestra que el valor de la constante cosmológica ha de ser menor que $1/(10^{23}$ kilómetros$)^2$, unos 46 órdenes de magnitud por debajo del valor predicho en el marco del modelo estándar. La gráfica está tomada de un análisis de Edwin D. Loh, basado en un trabajo con Earl J. Spillar.

Pese a las palabras de Aristóteles, la naturaleza no "aborrece el vacío", aunque tal vez sí deseche un vacío que no lo sea. Mediante la introducción del éter en los primeros días de la teoría electromagnética, Maxwell y otros físicos llenaron ese vacío con un fluido hipotético que tenía complejas propiedades. Michelson y Morley demostraron que esta visión del vacío repugnaba a la realidad experimental y Einstein corroboró que iba también contra las simetrías del universo.

Las teorías cuánticas de campos llenan, asimismo, el "vacío" esta vez con fluctuaciones cuánticas y con campos, no con éter. Estas formas modernas de llenarlo se muestran coherentes con la teoría de la relatividad especial, pero causan problemas cuando se contemplan bajo la perspectiva de la teoría de la relatividad general. El misterio de la constante cosmológica nos está diciendo, quizá, que estamos pagando de nuevo el precio de traficar demasiado con el vacío. El modelo estándar, poseedor de un gran número de campos cuánticos fluctuantes, entre ellos el campo de Higgs, es fuente importante de polución del vacío. No cabe ninguna duda de que la teoría resultante será una estructura bella y de gran éxito, pero basada a lo mejor en una concepción defectuosa del vacío o del espacio-tiempo. Ante nosotros tenemos el reto de reparar estos cimientos agrietados sin destruir el majestuoso edificio que hemos construido sobre ellos.

Juegos de ordenador

El profesor invisible dicta una conferencia ilustrada desde el monitor del ordenador

A. K. Dewdney

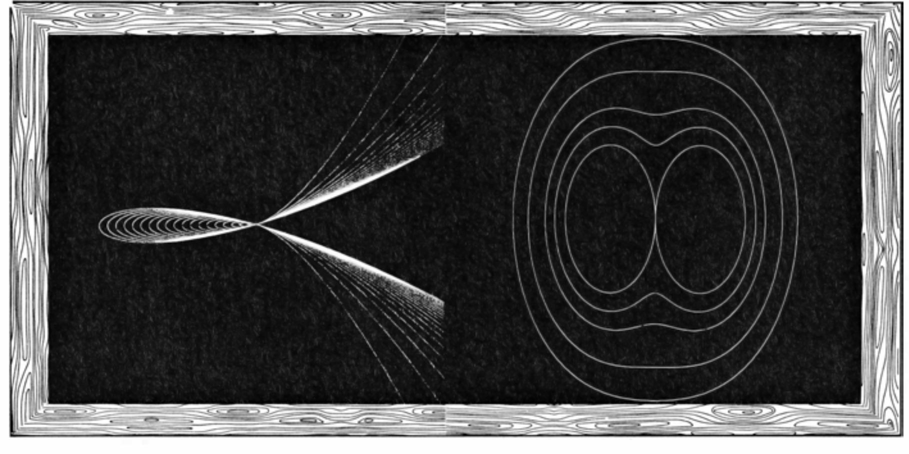
Si comparásemos la oscura pantalla del ordenador con una pizarra, ¿quién sería el dibujante de las gráciles curvas trazadas en su mate superficie? La mano ha de pertenecer al profesor invisible, encarnación electrónica de todos los docentes que han delineado con amoroso primor las curvas de la geometría analítica. Tienen estas curvas nombres románticos o misteriosos: bruja de Agnesi, campila de Eudoxo o nefroide de Freeth. Entre ellas se cuentan las parábolas, cicloides, espirales y serpentinas. Casi olvidadas cuando las matemáticas se apresuraron a cobrar generalidad y la geometría se hizo no-euclídea, esas curvas son testamento de las formas que obedecen a funciones físicas. Constituyen hitos de maravillosos descubrimientos, famosos algunos y otros menos, debidos a matemáticos de siglos pasados.

El profesor invisible es una colección de programas de ordenador de la mayor simplicidad que se pueda imaginar. Al dibujar las curvas, su belleza se plasma con un matiz excitante y cautivador que mal podrían haber imaginado sus descubridores: la nueva tiza es un punto singular y brillante, que traza, pongamos por caso, la ecuación cúbica de Tschirnhausen deslizándose por la pantalla a partir del ángulo superior derecho, pasando enseguida por el origen y formando luego un bucle que vira hacia arriba y atrás y retorna al origen. El punto sigue su ígneo camino hasta el ángulo inferior derecho de la pantalla, donde se extingue [*véase la mitad izquierda de la figura 1*].

A petición, el profesor invisible dibujará incluso una familia de curvas. La ecuación de la cúbica de Tschirnhausen contiene un símbolo especial, de valor constante. Al sustituir el símbolo por distintos valores numéricos, se dibujan versiones diferentes de la curva. La pantalla se llena de variaciones sobre el mismo tema; sólo echamos en falta la voz antigua y quebradiza del profesor: "Salta a la vista que esta curva es una parábola semicúbica generalizada, como nos está gritando la ecuación."

El profesor invisible puede también presentarnos un paisaje entero de funciones trascendentes a modo de familias de curvas paralelas ondulantes, o dejarnos entrever el océano de las funciones complejas, por distorsión curvilínea de una retícula. Tales programas, confeccionados por entusiastas de la geometría, tienen señalado un precio.

Para sentar los cimientos mínimos sobre el dibujo de curvas, me tocará ejercer de profesor invisible. Tomaremos como ejemplo de curva la humilde circunferencia. Tres de sus principales formulaciones darán lugar a otros tantos programas de dibujo.



*1. Veinte versiones de la cúbica de Tschirnhausen (*izquierda*) y cinco de la hipopeda (*derecha*)*

La primera y más familiar la hemos aprendido casi todos en el bachillerato:

$$x^2 + y^2 = c^2$$

Esta ecuación distingue los puntos que yacen en la circunferencia de los que no. Un punto de coordenadas cartesianas x e y pertenece a la circunferencia si al hallar la suma de los cuadrados de x e y resulta el cuadrado de c (el radio). Cuando se ejecuta el programa, quien lo utilice deberá proporcionar un valor de c.

Se puede utilizar la fórmula en un programa de dibujo de circunferencias dividiendo la curva en dos ramas, superior e inferior. El programa va dando a x una serie de valores y representando los correspondientes valores de y. Para ser útil, es mejor que y no se encuentre elevado al cuadrado. Consecuentemente, es preciso despejar la y en la ecuación anterior. Las dos ramas sólo se diferencian en el signo:

$$y = +\sqrt{c^2 - x^2}$$
$$y = -\sqrt{c^2 - x^2}$$

Sin embargo, esta expresión resulta poco elegante y de manejo un tanto incómodo. Quizá las coordenadas polares nos presten mejor servicio.

Las coordenadas cartesianas x e y miden las distancias horizontal y vertical desde un centro, llamado origen, hasta el punto que interese. Las coordenadas polares, r y θ, determinan de forma totalmente distinta la posición de los puntos. El punto se encontrará a r unidades de distancia del origen; la recta que los une subtenderá con la horizontal un ángulo θ. La ecuación polar de una circunferencia pasa a ser, sencillamente, $r = c$; sea cual fuere el ángulo θ, la distancia r de cada punto de la circunferencia al centro tiene que ser c. Por desgracia, pocos serán los lec-

tores que dispongan de lenguajes donde la representación de puntos se haga directamente en coordenadas polares.

La tercera de las formas principales de presentación se vale de las llamadas ecuaciones paramétricas. Las ecuaciones paramétricas resultan ideales para la relación de muchos programas de trazado de curvas:

$$x = c \cdot \cos(t)$$
$$y = c \cdot \mathrm{sen}(t)$$

En este caso, un parámetro llamado t varía de 0 a 360 grados; el programa representa los valores de x e y a saltos de un grado, pongamos por caso. Los lectores que no estén familiarizados con las funciones seno y coseno podrán informarse sucintamente en el manual del lenguaje que utilicen.

En el nivel algorítmico, una primera versión del programa que llamaré CÍRCULO podría tener el escuálido aspecto siguiente:

```
introducir c
desde t ← 1 hasta 360
  x ← c • cos(t)
  y ← c • sen(t)
  punto(x,y)
```

La versión exacta que haya de emplearse no diferirá mucho de la anterior.

Ni que decir tiene que el programa de trazado de circunferencias no será tan sencillo. Para empezar, el origen de coordenadas de la mayoría de los ordenadores se encuentra en un vértice de la pantalla. Habrá pues que desplazar el origen al centro de la pantalla. Por ejemplo, si ésta mide 200 × 150 puntos, la traslación de origen exigirá la siguiente modificación del programa:

$$x \leftarrow c \cdot \cos(t) + 100$$
$$y \leftarrow c \cdot \mathrm{sen}(t) + 75$$

El profesor invisible puede encarnarse ahora en una pléyade de programitas, dotados todos de la estructura básica ya expuesta. Lo único que cambia de unos a otros son las ecuaciones. En la cúbica de Tschirnhausen, por ejemplo, no se hace uso de senos ni cosenos:

$$x = 3a(t^2 - 3)$$
$$y = at(t^2 - 3)$$

El miniprograma que llamo Tschirnhausen se vale, en consecuencia, de un parámetro t, que recorre todos los valores comprendidos entre un mínimo y un máximo, determinados ambos por las dimensiones de la pantalla. En el caso $a = 1$, por ejemplo, la pantalla de 200 × 150 antes mencionada dará holgado acomodo a la curva cuando t se encuentre entre −4,4 y +4,4. En ningún ordenador digital puede el parámetro t recorrer continuamente un intervalo de valores; a lo sumo cabe incrementar t a pasos pequeños, para dar la impresión de continuidad. ¡La tiza no debe chirriar en la pizarra! Dado que esa particular pizarra dispone de 200 puntos horizontales, podría obtenerse un valor razonable del incremento de t dividiendo el recorrido de los 8,8 valores de t en 200 incrementos iguales. El cociente vale 0,044. Por otra parte, no siempre se traza la curva de la misma forma. Algunas zonas se dibujan más deprisa que otras, lo que provoca una separación distinta de los puntos. Afortunadamente, ese tipo de cómputos es tan barato (y rápido), que podemos rebajar el valor del salto a 0,01 sin la menor preocupación:

```
introducir a
desde t ← −4,4 hasta +4,4 con
          incrementos de 0,01
  x ← 3a(t² − 3) + 100
  y ← at(t² − 3) + 75
  punto(x,y)
```

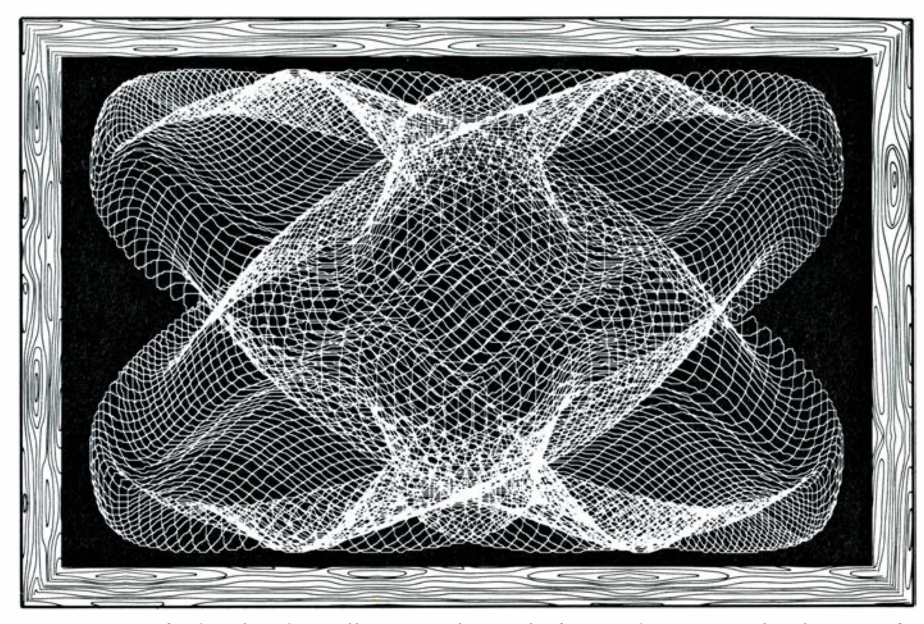
Otra manera sencilla de mejorar la suavidad de las curvas consiste en utilizar segmentos rectilíneos. Lo mismo TSCHIRNHAUSEN que cualquier otro de los programas aquí descritos pueden modificarse para que, cada vez que se obtenga un punto nuevo, una orden de dibujo de líneas lo una al punto dibujado antes. A continuación se remplazan las coordenadas del punto viejo por las del nuevo. Incluso una curva poligonal toscamente trazada puede parecer airosa a la vista.

En ambas versiones del programa puede añadirse un nuevo bucle exterior que varía la constante a de 0,1 a 2 en incrementos de 0,1. En este caso, el profesor invisible dibujará una familia de 20 curvas cúbicas maravillosamente encajadas unas en otras, que hubieran henchido de orgullo a Tschirnhausen.

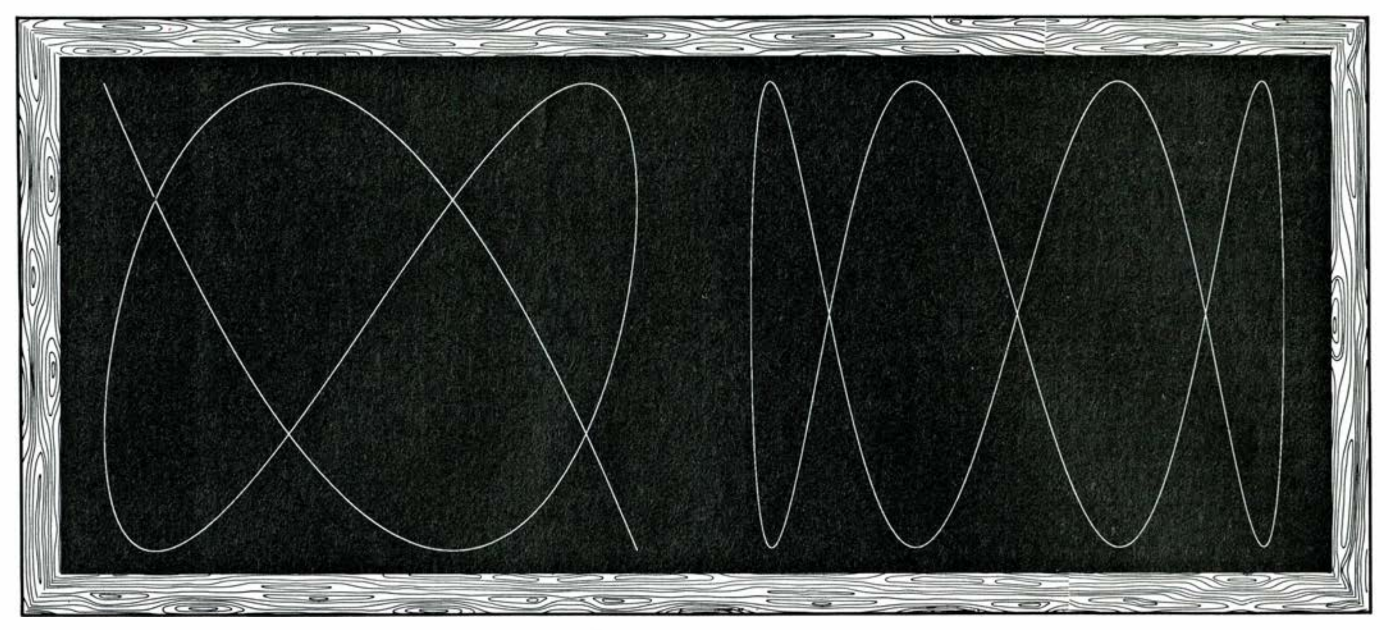
La hipopeda, investigada por vez primera por el filósofo griego Proclo hacia el 475 de nuestra era, tiene dos formas. Puede aparecer como un 8 tumbado de lado o bien asumir la forma de una pesa de gimnasia, en función de los valores de sus dos constantes, a y b [*véase la mitad derecha de la figura 1*]. Las ecuaciones paramétricas resultan aquí algo más complicadas:

$$x = 2\cos(t)\sqrt{ab - b^2\mathrm{sen}^2 t}$$
$$y = 2\mathrm{sen}(t)\sqrt{ab - b^2\mathrm{sen}^2 t}$$

El parámetro t varía de −180 a +180 grados. Se economiza algo de cálculo, pues la raíz cuadrada que aparece en ambas ecuaciones es la misma. En consecuencia, el programa HIPOPEDA sólo precisa calcular la raíz una vez, guarda su valor en una variable, digamos *temp*, y multiplica 2cos(t) y 2sen(t) por *temp*. Lo mismo que antes, los lectores que estén preparando su invisible profesor tendrán que calibrar el valor del paso. Aunque en cierta medida depende de a y de b, del tamaño de la pantalla y de otros factores, el incremento de un grado casi siempre resulta adecuado. Pueden ensayarse aquí también distintos valores de las constantes a y b, con valores comprendidos entre 1 y 10, en-



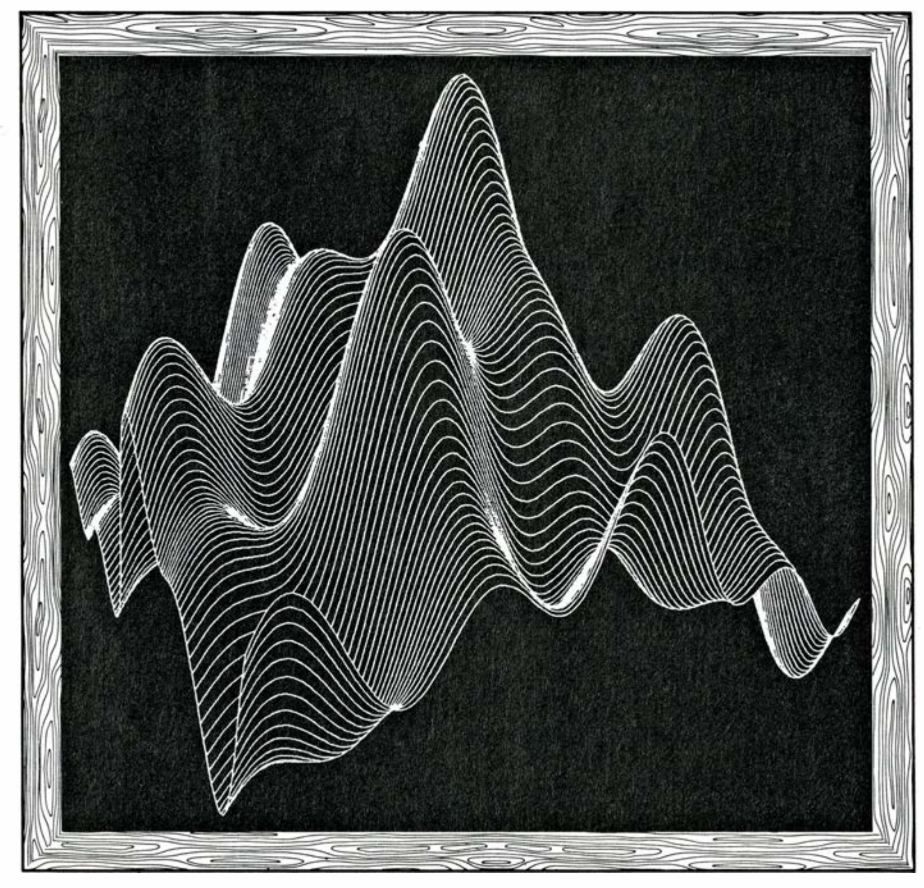
2. LOCURA, *de Stanley S. Miller, que ilustra la buena fortuna en la elección de constantes*



3. Dos curvas de Bowditch, una de las cuales repasa su trayectoria

teros o fraccionarios. El viejo y sabio búho ateniense nos contemplará fijamente desde la pantalla si, en las cuatro curvas, a toma sucesivamente los valores 20, 25, 30, 40 y 50 y b se mantiene en un valor fijo de 20.

Las espirales, que se cuentan entre las más hermosas formas que la creación nos ofrece, constituyen, por así decirlo, la segunda naturaleza del profesor invisible. No sorprende que donde mejor crezcan y prosperen sea en el medio polar. Los puntos de la espiral de Arquímedes tienen coordenadas polares (r,θ). La ecuación es (como gustan decir los matemáticos) "trivial": $r = a\theta$. El ángulo θ parte de 0 y puede aumentar todo lo que la pantalla (y la constante a) den de sí. El salto incremental puede valer 0,1 o menos. Dando el valor 0,01 a la constante a, la espiral se arrollará ceñidamente sobre sí; para un valor de a igual a 0,1, la espiral será mucho más abierta.



4. Superficie construida a partir de funciones simples

El profesor invisible puede también manejar fácilmente la famosa espiral logarítmica (también llamada espiral equiangular en atención a las respetables gentes a las que les aterrorizan los logaritmos). Habita esta espiral en las caracolas de mar y las corolas de los girasoles. El profesor invisible se sirve de la ecuación polar $r= e^{a\theta}$; como valor aproximado del número e podemos tomar 2,7183. El valor del incremento antes utilizado para la espiral de Arquímedes también sirve en este otro caso; empero, debo prevenir a los lectores de la gran velocidad de crecimiento de la función exponencial: ni siquiera tomando a igual a 0,01 permanecerá la curva cerrada mucho tiempo. Se cuentan por centenares las curvas que nos ofrece un pequeño manual en rústica de J. Dennis Lawrence: *A Catalog of Special Plane Curves*. El profesor invisible medrará a su gusto en esas nuevas curvas. Un proyecto interesante para programadores avezados: reunir todos los programas de trazado de curvas en un solo paquete que el usuario pueda manejar mediante una lista de opciones o, como suele decirse en la jerga especializada, un "menú".

En algunos casos no es preciso incorporar varios programas en el mismo paquete. La magia de la generalización permite crear un solo programa capaz de dibujar todas las curvas en cuestión. Todo consiste entonces en seleccionar valores correspondientes a las constantes que aparecen en la fórmula principal del programa. La circunferencia,

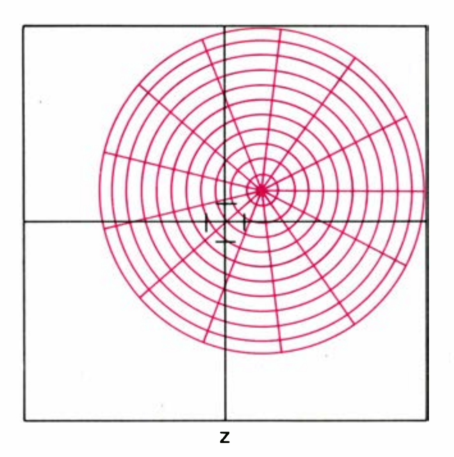
por ejemplo, no es más que un miembro de un tipo de figuras llamadas curvas de Bowditch, o figuras de Lissajous, que surgen de una sola ecuación paramétrica:

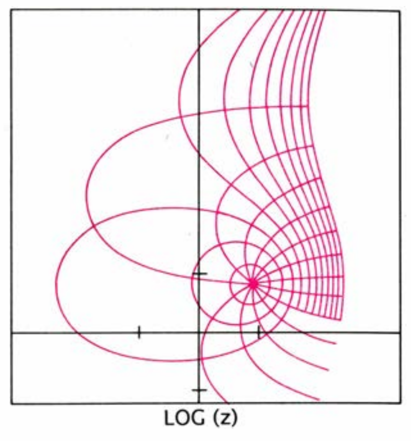
$$x = a \cdot \text{sen}(ct + d)$$
$$y = b \cdot \text{sen}(t)$$

Les resultarán familiares esas curvas a quienes posean osciloscopios de rayos catódicos, pues las señales electrónicas de variación sinusoidal las producen en la pantalla.

Las constantes a y b definen un rectángulo de a unidades de ancho por b de alto. Dentro de ese recuadro tejen las curvas de Bowditch sus danzas frenéticas. Las constantes c y d definen las diferencias. Cuando $d = 0$, por ejemplo, los valores $c = 3/5$ y $c = 1/4$ producirán las dos curvas que vemos en la figura 3. Cuando c sea racional, la curva de Bowditch volverá al punto de origen, repasando una y otra vez su trayectoria hasta que el profesor invisible pierda el aliento. Carece de objeto preocuparse de si los números de nuestro ordenador serán racionales o no, pues los ordenadores digitales sólo aceptan números de esa clase. (Los comentarios precedentes son válidos cuando t se mide en radianes. Para convertir las ecuaciones a grados hay que multiplicar el argumento de la función seno por $\pi/180$.)

En el caso de que el parámetro t comience en 0 grados, la curva de Bowditch partirá de algún punto del eje x. En general, va ondulando de un lado a otro, hacia dentro y hacia fuera, hasta olver a unirse consigo misma y formar una figura cerrada. Pero, ¿a cuánto ascenderá t cuando así suceda? He aquí un pequeño rompecabezas para lectores racionales. Quienes prefieran no devanarse los sesos, bastará con que no permitan que t rebase los 3600, a pasos incrementales de 1, y se limiten a números racionales de numerador y denominador pequeño. No faltan aventuras de final incierto para curiosos, para gentes con sentido del humor, o simplemente chiflados. ¡Agotemos al viejo profesor no fijando límite superior a t! Se podrá decidir entonces, observando el trazado de la curva mientras va calculándose, cuánto tardará en volver al principio. En este caso, el bucle a utilizar habrá de construirse mecánicamente. Finalizado el bucle, bastará una instrucción GO TO para devolver la ejecución a lo alto. Daríamos muestras de buen corazón, y le ahorraríamos al anciano docente una eternidad ante la pizarra, con sólo añadir una sentencia condicional mediante la que, al pulsar una tecla, el programa saltase a una línea exterior al bucle.





5. *Una función compleja* (izquierda) *y su logaritmo* (derecha)

Entre los factores que me animaron a sacar al profesor invisible de su guarida se encuentra una carta de Stanley S. Miller, de Concord, Massachusetts. Consejero de gestión empresarial, Miller se ha apasionado por los rastros que algunas funciones dejan tras de sí. Todo empezó con el programa CURVAS, disponible en el mercado y del que trataremos más adelante.

"Una noche, ya tarde y quizás achispado, explica, pulsé por error una tecla y apareció algo que nada tenía que ver con las cicloides que había generado hasta entonces... Primero pensé que se me había caído en el ordenador algo del Brie que estaba tomando, pero repetí la ejecución del programa con diferentes parámetros [es decir, constantes] y obtuve una pariente muy cercana de la gráfica anterior." Ese tropiezo con la fortuna dio a Miller una idea de la profunda potencia de los programas de generación de curvas razonablemente generales y de la variedad y riqueza de formas que permiten crear. Ofrezco un trofeo de tal caza en la figura 2. Parece una red tridimensional, apta para atrapar mentes impresionables. Por si fuera preciso bautizar la curva, llamémosla LOCURA de Miller. Sus ecuaciones paramétricas son de una inocente simplicidad:

$$x = \text{sen}(0{,}99t) - 0{,}7\cos(3{,}01t)$$
$$y = \cos(1{,}01t) + 0{,}1\,\text{sen}(15{,}03t)$$

No tengo idea del valor que debe alcanzar t para cerrar la curva. Nota para quienes deseen plasmar la LOCURA de Miller en su ordenador: conviene aplicar el bucle sin fin ya descrito; el parámetro t está expresado en radianes. Al programar LOCURA, el lector puede darle mayor generalidad anteponiendo constantes a las cuatro funciones trigonométricas. Dispondrá así de un espacio virtualmente infinito para sus exploraciones.

CURVAS, que inspiró a Miller, es un programa muy general preparado por Bridge Software, P.O. Box 118, New Town Branch, Boston, Massachussets 02258, Estados Unidos. Repleto de útiles opciones y refinadas funciones, viene a ser algo así como lo definitivo en profesores invisibles. Pero hay más. Bridge Software comercializa también un programa llamado SURF. Hemos tomado un ejemplo de él, que aparece en la figura 4. Al especificar el usuario una función de dos variables, el programa dibuja un paisaje tridimensional, dotado de las pertinentes montañas, valles y líneas ocultas. Ninguno de los programas tiene precio muy elevado.

No es Bridge Software la única compañía que produce programas matemáticos. Para quienes prefieran las funciones complejas, Lascaux Graphics, 3220 Steuben Avenue, Bronx, N.Y., 10467, ha creado un programa llamado $f(z)$. Muchos lectores recordarán el conjunto de Mandelbrot, que rememoramos en esta sección el pasado mes de enero. Quizás algunos se acuerden que todo cuanto allí ocurría tenía lugar en el plano complejo. Las funciones producidas por Lascaux Graphics son transformaciones del plano complejo sobre sí mismo. No podemos ver espacios de cuatro dimensiones, pero podemos casi sentir una función compleja al contemplar su efecto sobre el plano complejo; una malla polar regular [*véase la figura 5*] colocada en el plano se transforma, por efecto de una función compleja, en un objeto de curvilínea gracia, que insinúa las corrientes de un mar matemático. Algo más caro que CURVAS, $f(z)$ es una ganga para quienes están esperando iniciarse en los más excelsos arcanos de la pizarra.

Taller y laboratorio

El misterio de los carámbanos: ¿cómo logran congelar el agua?

Jearl Walker

Quizás esos carámbanos que en invierno penden de aleros y tendidos telefónicos nos hayan parecido siempre unas estructuras sin complicaciones. La realidad es otra. Desde hace tiempo, las formas que adoptan y la manera en que se desarrollan mantienen sumidos en la perplejidad a cuantos se han dedicado a su estudio. ¿Por qué adquieren una morfología cónica, con una extremidad no más ancha que unos dos o tres milímetros? Desde esa punta hasta algunos centímetros más arriba, discurre una estrecha columna de líquido que llena un tubo con las paredes de hielo. ¿Por qué? La existencia del tubo puede descubrirse con un mondadientes. ¿A qué se debe la línea blanca que parece materializar el eje geométrico de la columna? ¿Por qué, a lo largo de los costados de la columna, crecen unas costillas separadas entre sí por una distancia del orden de un centímetro? ¿Por qué es macizo el hielo en algunos lugares y esponjoso en otros? ¿Qué es lo que provoca el doblamiento y torsión de algunos carámbanos?

Los fenómenos físicos que intervienen en todo proceso de solidificación del agua son siempre ricos y complejos. Hay un modelo sencillo en el que la interfase entre líquido y hielo está formada por dedos dendríticos que se adentran en el líquido. Sobre esos dedos, las moléculas del líquido se van uniendo gradualmente a la estructura cristalina del hielo, cediendo parte de su energía e inmovilizándose. Esa energía perdida, que llamamos calor, pasa por conducción a otro lugar más frío que la interfase en proceso de congelación, a menudo, al aire frío contiguo.

Los carámbanos crecen siguiendo ese proceso. Norikazu Maeno y Tsuneya Takahashi, de la Universidad de Hokkaido, han estudiado el comienzo de ese crecimiento. Imaginemos una capa de nieve que se esté fundiendo lentamente sobre un tejado. Cuando el agua empiece a escurrirse por el borde del tejado, formará una gota, que colgará en el seno de aire frío. Cuando los bordes de la gota inicien su congelación y constituyan una fina lámina de hielo, el calor liberado en el proceso se transmitirá al aire y al filo del tejado.

A medida que vaya descendiendo más agua de fusión por la cáscara de hielo, se irá helando, en parte, por el camino y contribuirá a ensanchar el carámbano naciente. El resto se unirá a la gota que pende del extremo inferior de la estructura [*véase la figura 2*] y la congelación gradual de los bordes de la gota contribuirá a alargar el carámbano. Si la gota creciera demasiado (más de cinco milímetros) caería, pero no tardaría en formarse otra gota, merced al aflujo de agua de fusión. En tanto prosiga la llegada de agua, el carámbano irá ganando en anchura y en longitud. La punta, cuya anchura establece el diámetro de la gota colgante, seguirá siendo estrecha.

H. Hatakeyama, del Observatorio Meteorológico del Distrito de Tokio, y S. Nemoto, del Instituto de Investigación Meteorológica de Tokio, han informado de otro proceso merced al cual podría también iniciarse la formación de un carámbano [*véase la figura 3*]. La parte superior de la primera gota puede helarse uniformemente, creando una interfase de congelación horizontal que se desplaza hacia abajo. Si el aflujo de agua es escaso y el filo del tejado está frío, puede helarse cuanta agua haya, y no sólo una capa fina. Entonces, la estructura se iría alargando a tramos, a medida que fuesen llegando al extremo inferior las gotas, una tras otra, del agua de fusión, y se fuesen solidificando. Ahora bien, si el agua llega con un caudal suficiente para mantener una gota colgante, en algún instante del crecimiento del carámbano los bordes de la gota se congelarán y darán origen a una cáscara de hielo, igual que en el modelo de Maeno y Takahashi.

Sea como fuere, a partir del instante en que se forma una lámina de hielo, el líquido encerrado en ella sólo puede congelarse lentamente. Según Lasse Makkonen, del Centro de Investigación Técnica de Espoo, en Filandia, el calor liberado por la congelación interna pasa, por conducción a través del hielo, a la parte superior del carámbano (que se llama "raíz") y luego al filo del tejado. Esa conducción es tan gradual que la interfase de congelación interna puede descender muy despacio a lo largo del eje del carámbano. Si la interfase estuviera ya muy alejada de la raíz, como en el caso de un carámbano desarrollado, podría incluso permanecer estacionaria.

Entre la interfase y la punta del carámbano, el líquido queda encerrado en un estrecho tubo de hielo. No obstante su peso, el líquido es estable, en parte a causa de la tensión superficial entre el mismo y las paredes del tubo. Además, éste es tan estrecho que las perturbaciones casuales de la parte inferior de la columna de agua no suelen ser suficientes para permitir la infiltración de aire que drene el líquido. Bajo temperaturas invernales comunes, la interfase de congelación interna puede llegar a la punta, dando lugar a un carámbano, en el caso exclusivo de que cese el aflujo de agua de fusión y, con ello, el crecimiento de la punta.

La superficie externa del hielo está envuelta en una lámina delgada de agua [*véase la figura 5*]. En la interfase externa hielo-líquido, la congelación es rápida, puesto que el calor liberado atraviesa, rápidamente y por conducción, el líquido; calor que se disipa en el aire. (Maeno y Takahashi descubrieron que la vaina líquida en los carámbanos activos no superaba los 0,1 mm de grosor.) En la interfase de congelación, la temperatura es la de solidificación del agua, o sea, cero grados Celsius, si el agua es pura; aunque menor, si es impura. En el resto de la capa de agua, la temperatura es inferior al punto de solidificación, situación conocida como sobreenfriamiento. El agua más fría es la que se halla en contacto con el aire y éste, desde luego, puede estar considerablemente más frío que el agua.

Charles A. Knight, del Centro de Investigación Atmosférica de Boulder (Colorado), señala que pueden desarrollarse carámbanos en el seno de un aire que esté más caliente que el punto de solidificación, con tal de que ese aire contenga poco vapor de agua. La escasez de vapor provoca la evaporación del agua de la superficie externa de la vaina; cuando las moléculas de agua escapan del líquido, arrastran consigo energía y sobreenfrían la superficie del agua. El agua sobreenfriada se convierte en una suerte de vertedero de ca-

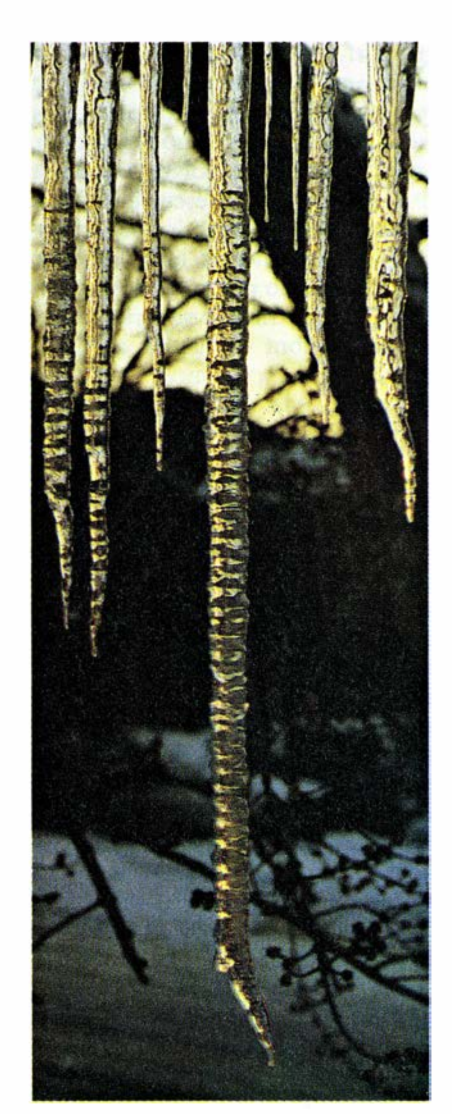
lor, al que el agua en proceso de congelación sobre la superficie del hielo envía el calor que contiene.

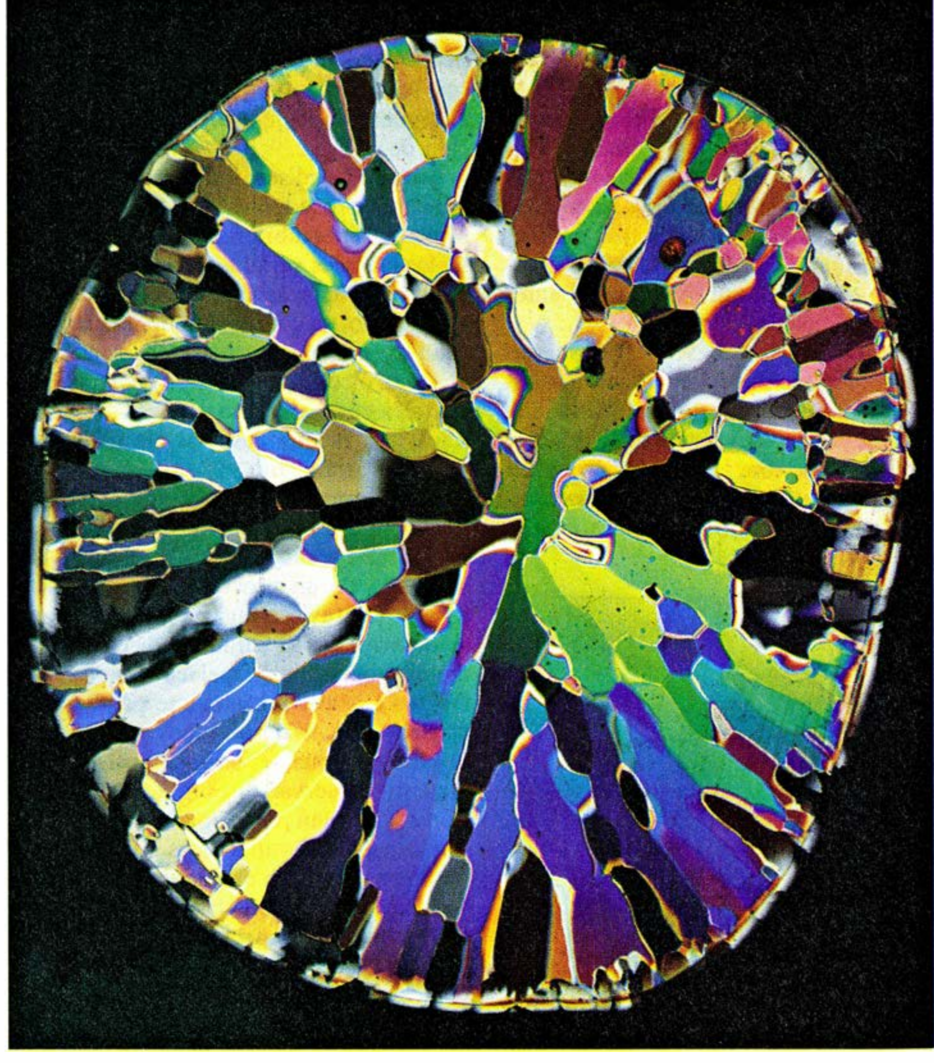
¿Por qué el calor liberado en la interfase de congelación interna no atraviesa horizontalmente y por conducción la delgada capa de hielo que lo separa del aire? La razón estriba en las dos interfases de congelación, la interna y la externa, que se hallan en el punto de solidificación del agua; al no haber diferencia de temperaturas, no puede haber conducción. Para que avance la interfase interna, el calor liberado debe pasar por conducción a la raíz del carámbano.

Cuando se congela el agua interna o externa de un carámbano, el aire disuelto en ella se ve obligado a salir y forma burbujas, que quedan aprisionadas en el hielo. De estas burbujas llaman la atención aquellas, diminutas, que se desarrollan a lo largo del eje geométrico conforme va descendiendo la interfase de congelación interna. Cuando el carámbano se ilumina con luz blanca, parte de ésta se dispersa en las burbujas, mostrando a lo largo del eje una aparente línea blanca.

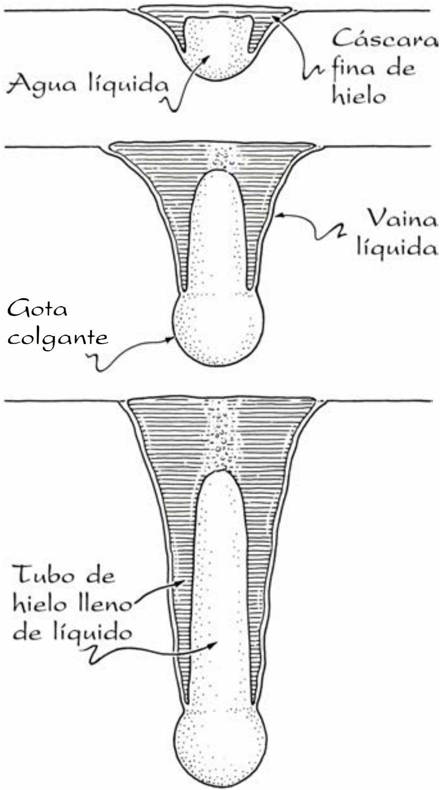
Según Maeno y Takahashi, un carámbano se alarga con una velocidad de 8 a 32 veces superior a la de su ensanchamiento. En mi opinión, una de las razones de tal desigualdad entre las velocidades de crecimiento residen en la punta, donde se reúne más agua que en cualquier otro punto de los bordes. Puede que haya otra causa, relacionada con la manera en que crecen los cristales de hielo. La geometría básica de un cristal de hielo es la de una placa hexagonal delgada. El eje perpendicular al plano de la placa (plano basal) que pasa por el centro del hexágono se llama eje *c*. Cuando la placa gana moléculas, su crecimiento es más rápido en el plano basal que según el eje *c*. Si en los carámbanos los cristales están orientados con el eje *c* (que apunta radialmente hacia fuera, esto es, perpendicular a la interfase de congelación y, por ello, aproximadamente perpendicular al eje central del carámbano), cabe esperar que el crecimiento de éste sea más rápido en longitud que en anchura.

Las primeras investigaciones acerca de la orientación predominante de los cristales de los carámbanos estuvieron muchas veces presididas por las contradicciones. Algunos investigadores llegaron incluso a sostener que no había orientación predominante y que un carámbano era un revoltillo de cristalitos orientados al azar. En un intento por resolver la cuestión, Robert A. Laudise y Robert L. Barns, de los laboratorios AT&T Bell, de Murray Hill (New Jersey), se propusieron, junto con un grupo de jóvenes voluntarios, la tarea de examinar carámbanos recogidos en las casas de los alrededores. Recogieron, serrándolos de sus soportes, carámbanos de más de dos centímetros y medio de diámetro. Volvieron a serrar las





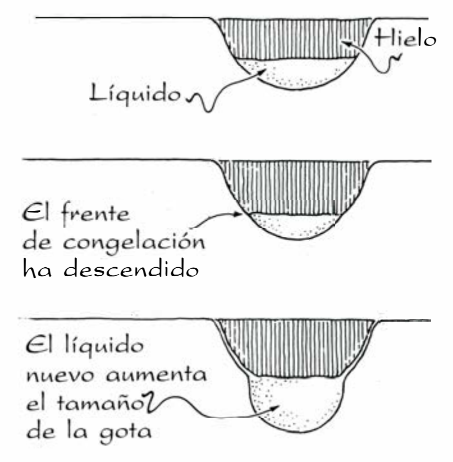
1. Carámbanos con costillar (**izquierda**) *y sección de un carámbano fotografiada a través de filtros polarizadores cruzados* (**derecha**)



2. Modo de crecimiento en cáscara delgada

muestras después, para obtener secciones transversales y longitudinales. Trabajando en una cámara frigorífica, los investigadores redujeron cada sección hasta un espesor de unos tres milímetros frotándolas contra una placa gruesa de aluminio que entibiaban antes con agua caliente.

Para la inspección, se emplearon dos filtros polarizadores "cruzados", instalados sobre una plataforma con una tapa de vidrio. (El sistema fue descrito en esta sección, en septiembre de 1986.) Se colocaba entonces sobre el vidrio uno de los filtros, y sobre éste se depositaba una rodaja de muestra; se sumaba a ésta un segundo filtro, que rotaba de modo que su dirección de polarización cayera perpendicular a la del primer filtro. Un cartón blanco situado bajo la plataforma difundía la luz procedente de una lámpara que se polarizaba al atravesar el filtro inferior.



3. Modo de crecimiento en congelación uniforme

En ausencia de la muestra de carámbano, la luz no podría atravesar el segundo filtro. Pero cuando la luz atraviesa un cristal de hielo, su polarización gira. Así, según la cuantía de esa rotación, toda la luz o parte de ella atravesará el segundo filtro. Cuando se mira atentamente, a través del conjunto, entornando los ojos, los distintos cristales de hielo presentarán una luminosidad diferente, en función de la cuantía en que cada uno gire la polarización de la luz que lo atraviese. Con una sección fina, las zonas aparecerán incluso dotadas de coloraciones diversas. Si la rodaja se hace girar en torno a la dirección vertical, la luminosidad de cada cristal variará, salvo que su eje *c* venga a coincidir con la visual del observador, en cuyo caso permanecerá oscuro durante toda la rotación. Inspeccionando así un corte de carámbano con luz polarizada, podremos detectar el tamaño de los cristales y la orientación de su eje *c*.

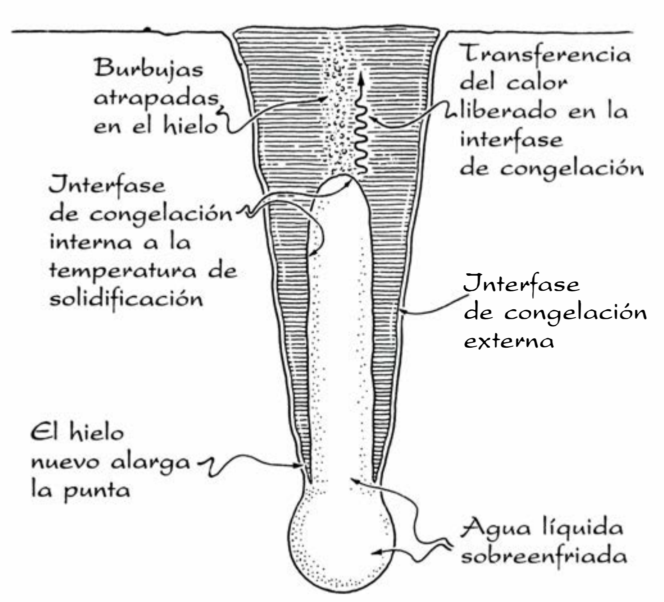
Cuando Laudise y Barns examinaron muestras procedentes de unos 60 carámbanos, descubrieron que la anchura de los cristales variaba desde menos de 0,8 mm hasta más de 20 cm. Algunos carámbanos se componían de una multitud de pequeños cristales orientados al azar; otros poseían grandes monocristales cuyo eje *c* no parecía ser paralelo, en ningún caso, al eje geométrico del carámbano.

Posteriormente, Knight adelantó la idea de que la orientación del eje *c* de los cristales grandes podría ser quizás el resultado de un proceso de recristalización que tuviese lugar a medida que se desarrollara el carámbano. Conforme el proceso de congelación cede calor, los cristales inicialmente pequeños y orientados al azar podrían cambiar de bordes y fusionarse, orientándose de la manera observada por Laudise y Barns. Podrían desempeñar también cierto papel las variaciones de la temperatura del aire o el aporte de luz solar y agua de fusión. Pero Knight advierte también la posibilidad de que la orientación de los cristales influya muy poco en la forma de un carámbano. La desigualdad entre las velocidades de crecimiento podría deberse al modo en que se elimina el calor de un carámbano, siguiendo, hasta cierto punto, el modelo de Makkonen.

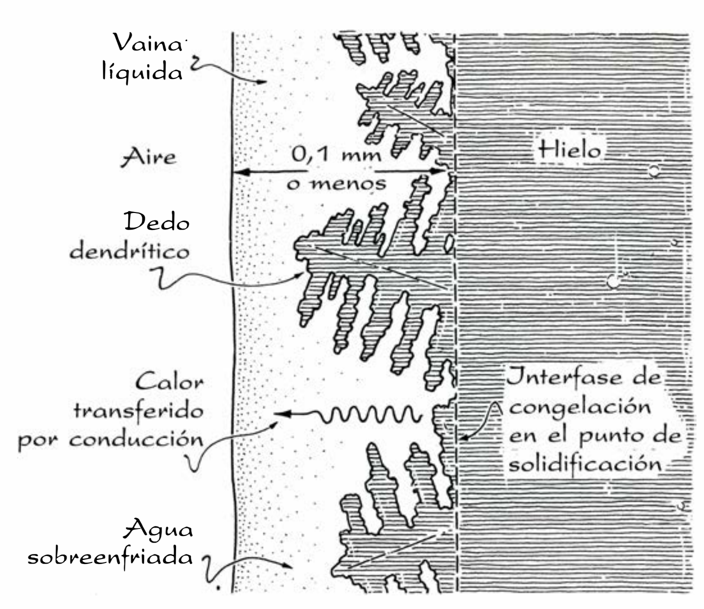
Sorprende la relación entre la velocidad de crecimiento de un carámbano y el ritmo con que afluye el agua de fusión. Según Maeno y Takahashi, la velocidad de ensanchamiento es, en gran parte, independiente del caudal; la velocidad de alargamiento, por otro lado, decrece con el aumento del caudal. El primer descubrimiento sugiere que la vaina líquida mantiene un espesor constante, regulando así la velocidad de conducción del calor que la atraviesa y la velocidad de congelación en la superficie del hielo. El segundo descubrimiento resulta más difícil de entender. ¿Aminora la velocidad de alargamiento el calor que se libera cuando afluye un caudal mayor de agua a la gota y entonces se sobreenfría? ¿Reduce la posibilidad de que se congelen las gotas de la punta el hecho de que aumente la frecuencia con que se desprenden gotas, o bien trastorna el crecimiento del hielo?

Ira W. Geer, de la Universidad de Brockport, descubrió que la punta de un carámbano puede ser tan irregular que el aire se abra paso hacia arriba por el tubo de hielo, expulsando el líquido. El tubo no tarda en volver a llenarse con el líquido que se escurre hasta la punta a lo largo del exterior del carámbano y, seguidamente, asciende tubo arriba, impulsado por la tensión superficial. En los tramos superiores del tubo acostumbra a quedar atrapada una gran burbuja de aire, que luego queda encerrada entre hielo, cuando desciende la interfase de congelación interna.

Geer investigó el crecimiento de un carámbano fotografiándolo, cada cinco minutos, durante hora y media. A partir de los negativos, compuso un dibujo al objeto de determinar si las costillas horizontales de los costados emigran verticalmente en el transcurso del crecimiento. Descubrió así que las costillas permanecían aproximadamente estacionarias; se trataba de zonas que crecían hacia fuera con mayor rapidez que los huecos que las separaban. Maeno y Takahashi ofrecen dos explicaciones acerca del crecimiento rápido de las costillas. La capa líquida es más tenue en las costillas que en los huecos, con lo que el calor procedente de la congelación de la superficie del hielo viaja con mayor rapidez hacia la superficie del agua. Además, cada costilla está más expuesta, favoreciendo la transferencia de calor al aire y, acaso, la evaporación del agua.



4. La punta del tubo de hielo



5. Transmisión del calor a través de la lámina de agua

En las secciones de un carámbano cortadas horizontalmente pueden verse las señales del crecimiento rápido de las costillas. Una sección sacada de la zona de una costilla exhibe abundantes burbujas de aire reunidas en bandas que se asemejan a los anillos de crecimiento que se observan en el corte transversal de los árboles. Cada una de esas bandas se crea cuando la costilla crece hacia fuera, atrapando aire antes de que éste pueda escapar. Cabe suponer que las bandas están vinculadas a variaciones en la temperatura del aire y en el aflujo de agua.

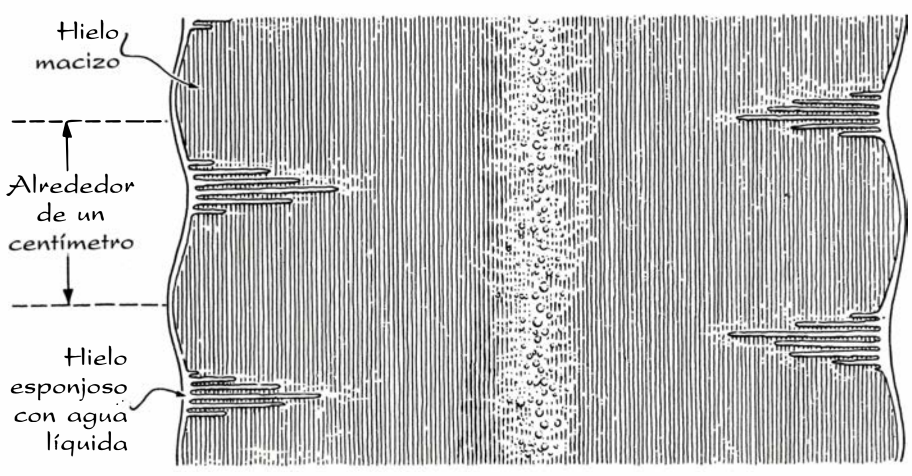
Knight descubrió que las costillas acostumbran a ser de hielo macizo, mientras que los huecos suelen ser esponjosos y están constituidos por líquido que separa capas de hielo que son prolongaciones de los planos basales de los cristales. Según él mismo manifiesta, pudo introducir la hoja de un cuchillo hasta una distancia de un centímetro o más en las zonas esponjosas, obligando a salir parte del líquido. Sugiere Knight que las zonas esponjosas se desarrollan durante los períodos en que el carámbano pierde calor con rapidez y el caudal de agua es abundante, pero opina que este extremo requiere ulterior estudio.

En los carámbanos desarrollados se generan asimismo unas aristas verticales, a menudo complejas y ramificadas. Pueden deberse al viento, puesto que éste aumenta la eliminación de calor y, por tanto, la velocidad de congelación, en un costado del carámbano. Otro factor es la posible asimetría del caudal de agua. Ocurre que, en un carámbano ancho, el agua puede fluir siguiendo un reguero estrecho, sin humedecer uniformemente todo el carámbano. Geer observó que el agua que se escurre por un carámbano inactivo tiende a seguir cierto curso, en tanto éste se mantenga húmedo. La arista que produce puede crecer hacia fuera hasta cinco milímetros o más, antes de que el agua adopte un curso distinto. Una gota de agua puede seguir un curso ya húmedo porque encuentra en éste menos tensión superficial que en una zona seca y helada.

A veces, los carámbanos aparecen adornados de unas diminutas púas que sobresalen de la superficie. Maeno y Takahashi midieron púas de un milímetro de anchura y de hasta 20 mm de longitud. Estas púas se crean cuando la película de agua se congela durante algún intervalo de escasez de agua de fusión. Así, cuando el agua líquida que queda encerrada bajo una película de hielo comienza a congelarse, su dilatación puede romper dicha lámina y expulsar hacia el exterior de la superficie el líquido restante; ese líquido expulsado se congela entonces formando una púa. ¿Hay mayor probabilidad de que se formen las púas en el hielo inicialmente esponjoso, donde el líquido se congela despacio?

Observé en la punta de un carámbano un tipo de púa diferente. El colapso del puente líquido entre una gota que se desprende y el líquido que se queda en la punta solía dejar un hilo de agua que se congelaba de inmediato. Ese hilo de hielo, de menos de un milímetro de grosor y sólo de dos o tres de largo, aparecía retorcido, lo que demostraba la rapidez de la congelación. El mero contacto con mi dedo desnudo fundía el hilo y lo mismo pasaba con la gota colgante siguiente.

Los carámbanos acostumbran a ser



6. Costillas horizontales en los costados de un carámbano

asimétricos, a encorvarse y desviarse de la dirección vertical. Maeno y Takahashi dan varias razones para ello. Una conformación complicada puede deberse a un caudal de agua asimétrico, especialmente en los carámbanos anchos. Un viento estable puede descentrar también el crecimiento, empujando las gotas suspendidas hacia sotavento y aumentando la pérdida de calor en el lado de barlovento del carámbano. Si éste se desarrolla colgado de una rama, el aumento gradual de peso la doblará e irá curvando el carámbano conforme las porciones recién crecidas de la punta vayan manteniéndose en la vertical. Análogamente, si el carámbano crece en el borde de un tejado, la fusión parcial del hielo y la nieve que haya allí puede hacer que la capa se mueva y se curve poco a poco en torno al borde, cambiando así la dirección de crecimiento. A estas explicaciones podríamos añadir la posibilidad de que sobre el carámbano se acumule nieve arrastrada por el viento, lo que podría también deformarlo.

Se pueden encontrar diversas sugerencias valiosas para el estudio de los carámbanos en los artículos citados en la sección de "Bibliografía". Geer se pregunta de qué modo podría modificarse el crecimiento de un carámbano si al agua se añadiera alguna impureza (sal, jabón, alcohol o un colorante). ¿Cómo serían las burbujas en un carámbano desarrollado en agua carbonatada sin sal? Cuando un carámbano normal se hace inactivo, ¿de qué modo la sublimación alisa gradualmente su superficie?

Podemos añadir otras propuestas a nuestra lista. ¿Cómo podría alterar el crecimiento posterior del carámbano un clavo que se incrustara en la punta del tubo de hielo? ¿Cómo se distribuye la temperatura dentro de un carámbano formado? ¿Qué factores determinan la longitud del tubo de hielo y el tamaño y espaciado de las costillas horizontales? ¿Influyen en su forma la radiación infrarroja procedente de objetos calientes próximos o la turbulencia del aire en el costado de sotavento? ¿Cómo crecen los carámbanos de agua de mar y de agua dulce? Quien se halle dispuesto a ponerse a trabajar podría tratar de correlacionar la velocidad de crecimiento de un carámbano con la temperatura del aire ambiente y la velocidad del viento. Recibiré con todo interés las noticias que me lleguen de los lectores acerca de sus observaciones sobre estas tan a menudo ignoradas esculturas de hielo.

Libros

Ottocento, astronomía española y dislexia

Luis Alonso, José L. Comellas y Francesc Asensi

L'OCCHIO E LA MENTE. SCIENZE E FILOSOFIA NELL' ITALIA DEL SECONDO OTTOCENTO, por Giovanni Landucci. Leo S. Olschki editore; Firenze, 1987.

Si hay un capítulo candente en la historia, la sociología y la filosofía de la ciencia ése es, sin la menor duda, el relativo a la segunda mitad del XIX italiano. En lo político se ha consumado la unidad de la nación tras una larga guerra civil y en lo ideológico ha hecho acto de presencia la disputa darwinista. La simplificación, para el historiador poco avisado, está servida: los partidarios del estado laico serán los defensores de la ciencia, pongamos en este caso de la evolución, y los que han pugnado en el bando opuesto la rémora, la intransigencia, el retraso y demás reprobaciones eternas.

(No menos tentadora es la sugerencia de la comparación con lo que en ese período ocurre en España. No menos tentadora y no menos simplista. En efecto, tres guerras civiles contabiliza el XIX hispano y una agria disputa entre transformistas y fijistas. El progreso estaba en los darwinistas y el averno en los escépticos o detractores, se escribía, hasta hace poco, sin perder la compostura. Ni que decir tiene que en la "caverna" militaban desde Virchow en Alemania hasta Pasteur en Francia pasando, entre nosotros, por Vilanova. La historia de las ciencias naturales ha avanzado lo suficiente para rechazar semejantes dicotomías para uso de chalanes de feria.)

L'occhio e la mente se inscribe en una colección, dirigida por Paolo Rossi y Walter Bernardi, sobre el pasado de la ciencia y, en particular, de las ciencias biomédicas. Quiere ello decir que se ajusta a unas normas de rigor histórico y de metodología que pretenden conferir la máxima objetividad a sus obras. Lo que no significa caer en el llamado positivismo histórico, de hechos nudos de interpretación, ni abrazar el ensayo ahíto de soporte. La epístola íntima se trenza con la disección fría de los textos públicos para poner en su cabal significado las influencias, las lecturas, los experimentos realizados y demás herramientas de las que todo científico se sirve en su creación.

Hay en este libro, además, un marco de agitación política —léase fortalecimiento de las instituciones sociales e intervención en la orientación de las mismas— que permite hacerse una idea del esfuerzo de Italia por olvidar el enfrentamiento de años atrás y crear un país nuevo, y un fondo de inquietud filosófica —a favor o en contra de Rosmini—. Ambos, marco político e inquietud filosófica, explican ciertas componentes del resurgimiento científico de la nación. (Sin insistir en comparaciones, España careció de una figura señera en filosofía en ese tiempo; la importación del krausismo, de escasa entidad especulativa en comparación con las escuelas idealistas contemporáneas, se ha querido edulcorar con la influencia ejercida en pedagogía por algunos de sus adscritos.)

Landucci ha dividido su libro en cuatro capítulos: Antonio Stoppani y la filosofía geológica; Filippo Parlatore, la filosofía botánica y su circunstancia; Paolo Mantegazza y la "historia natural del hombre", y, por último, los "descendientes" de Rosmini y Stoppani. Esto es, ha escogido un autor para representar el estado de determinada disciplina, y lo ha escogido porque en él encuentra el prototipo del científico que se preocupa por poner sobre la mesa los métodos y los principios de la materia que investiga o enseña. A través de la persona se nos introduce en el medio académico donde se desenvuelve y en el entorno más dilatado de la cultura del país; por ejemplo, en el capítulo sobre Stoppani llegamos a conocer los entresijos de la paleontología en la región lombarda y la difusión de las ideas químicas, físicas, zoológicas y botánicas entre el pueblo llano mediante su libro *Il Bel Paese*.

Filippo Parlatore personifica el botánico que engarza la vieja escuela de sistemáticos preocupado todavía por hallar las notas precisas de un "buen método natural", es decir, del conjunto de criterios que permita clasificar los vegetales según propiedades distintivas y no apoyándose meramente en el aparato sexual, según postulaba Linneo, engarzar, digo, esa tradición que arranca de Jussieu con los nuevos aires de la anatomía comparada. Principios que procura llevar a la práctica en su ponderada flora de Italia.

La cuestión metodológica es trasladada al campo de la antropología por Paolo Mantegazza, en su *Del metodo nei nostri studi antropologici* (1870). Entre otros puntos de interés recoge la atención que debe prestarse a la lingüística para reconstruir la historia del hombre, tema éste que constituía uno de los pilares de la antropología del siglo pasado y que, como es sabido, se halla hoy a extramuros de la antropología física, la única que tiene reconocido estatuto biológico. El estudio sobre Mantegazza nos ilustra también sobre la opinión reduccionista de algunos en los pares hombre-mono, inteligencia-sensación nerviosa, célula-mecanismo molecular, etcétera, y la prudente y cauta postura de otros, él entre ellos, que esperan pruebas.

Las pruebas eran, justamente, el caballo de batalla en la polémica darwinista italiana, que Landucci hace girar en torno a la figura de Giovanni Giovannozzi y, en menor medida, T. Catani. Los intereses políticos se entreveran con las razones científicas, como ocurre, en ese momento, en todos los países. (Salvo en Bélgica, quizá, donde el darwinismo se expone, por casi todos, tal como es entonces: una mera hipótesis de trabajo.) Sin pruebas, que no llegarán hasta el segundo tercio del siglo XX, con un registro fósil incompleto, Giovannozzi tuvo que aguzar su ingenio para apelar a la necesidad de las hipótesis en el avance científico y acotar el alcance y el sentido de los me-

canismos de la evolución. Sus razones siguen siendo válidas. (L. A.)

ASTRONOMIA Y CARTOGRAFIA DE LOS SIGLOS XVIII Y XIX, por Juan Vernet *et alii*. Observatorio Astronómico Nacional y Comisión del Quinto Centenario; Madrid, 1987.

En 1987, y con motivo del Segundo Centenario de la muerte de Carlos III, se celebró en Madrid la exposición de objetos, planos y reproducciones que lleva el título arriba indicado. La comisión organizadora consideró conveniente unir al catálogo una serie de breves monografías, escritas por especialistas en las respectivas materias, que, junto con el catálogo propiamente dicho, más una serie de biografías y los correspondientes índices, constituyen el formato que ahora comentamos. No cabe duda de que este enriquecimiento ha constituido un acierto, por cuanto el catálogo de una exposición se nos ha convertido en un interesante libro de consulta a nivel medio, que viene a cubrir un hueco en la no muy abundante bibliografía española contemporánea sobre esas especialidades.

Además de sendos prólogos-presentación de Luis Yáñez-Barnuevo, Secretario de Estado para la Cooperación Internacional y para Iberoamérica, de Angel Arévalo Barroso, Director General del Instituto Geográfico Nacional, y de Manuel López Arroyo, Director del Observatorio Nacional, el libro incluye varios trabajos científicos. El primero: *Cultura científica y astronómica en los siglos XVIII y XIX* (págs. 1-8), por Juan Vernet Ginés. Vernet, catedrático de la Universidad de Barcelona, es una de nuestras primeras autoridades en el campo de la historia de la ciencia, y compone aquí un breve, pero enjundioso artículo sobre el renacimiento científico del siglo XVIII español, con sus expediciones oceanográficas y cartográficas, su atenta observación de la naturaleza —que permitió a España el descubrimiento del platino, del vanadio y del wolframio— y la fundación de academias y de escuelas difusoras del saber científico. No tan afortunado fue el siglo XIX, aunque, superada la crisis interior de su primer tercio, la época isabelina fue pródiga en la creación de centros especializados, sobre todo en el campo de las ciencias exactas y naturales; no tanto de la astronomía, que sólo contó, hasta mediados de la centuria, con el Observatorio de la Marina en San Fernando, que, bajo la labor de excelentes directores, mantuvo el nivel relativo propio del siglo anterior. (El prometedor Observatorio de Madrid, destruido por la francesada, no comenzó a reconstruirse hasta 1853, y tropezó casi siempre con dificultades para su eficaz desenvolvimiento.)

Astronomía, geodesia y navegación en la Armada española de la Ilustración en el Real Observatorio de la Marina de Cádiz (págs. 9-32), por Manuel Catalán Pérez-Urquiola, actual director de este centro, es un estudio de alta calidad sobre la labor de nuestros marinos-científicos —que en el siglo XVIII unían perfectamente ambos cometidos, desde Jorge Juan y Antonio de Ulloa, hasta Tofiño y Malaspina—. Especial relieve cobra el estudio de la expedición de los dos primeros al Ecuador, para medir la longitud del arco de meridiano y realizar trabajos de triangulación y cartografía que fueron modelos de precisión y buena técnica dentro de la época.

En este sentido, fue decisiva la fundación, ya en 1717, de la Escuela de Guardiamarinas, de la que salieron aquellos primeros estudiosos, y, al regreso de Jorge Juan, el establecimiento por éste del Observatorio de Cádiz (1753), que realizó una importante labor, a la altura de las mejores del mundo, en el campo de la astronomía de posición (labor que hoy se continúa, hemos de añadir nosotros, con un puesto puntero en la determinación de la medida del tiempo y de la geodesia por satélite). "El Real Observatorio de Cádiz no sólo marcó el estudio sistemático de la Astronomía en España, sino que impulsó la modernización de la Ciencia española" (pág. 29).

Expediciones científicas españolas en el siglo XVIII (págs. 33-52), por la historiadora Mercedes Palau Baquero, es un estudio sencillo, grato de lectura y sumamente útil sobre uno de los campos en que la aportación científica de España al mundo de la Ilustración se hizo más patente. Tres factores se unieron en el deseo de conocer mejor la configuración de los dominios de la Corona española: el militar, el administrativo y el puramente científico; y los tres se complementaron admirablemente.

La profesora Palau analiza con amenidad los resultados de las expediciones al Pacífico: la de La Condamine-Juan-Ulloa, la de Córdoba-Churruca-Galiano a la Patagonia, que levantó los planos más perfectos hechos hasta entonces, y toda la serie de viajes que entre 1774 y 1798 recorrieron la costa de California a Alaska, levantando planos, recogiendo minerales y estudiando la vida, tanto humana como animal de tan extensa zona. Comprobaron la inexistencia del mítico "paso del Noroeste", y se adelantaron a ingleses y rusos en la exploración y el control de las costas del Pacífico.

Cartografía española en el siglo XVIII (págs. 53-70), por Rodolfo Núñez de las Cuevas, ingeniero geógrafo, estudia principalmente las empresas realizadas para mapear la Península, sin olvidar por eso las expediciones a Ultramar. Es curioso que el sistema de triangulación sistemática, puesto en práctica ya por Juan y Ulloa en 1744 en Perú y Ecuador, no se haya realizado a fondo en la Península hasta la época final de la centuria. Con todo, el espíritu científico de la Ilustración trajo a España "un cambio epistemológico fundamental en las ciencias geográficas; la adecuación entre teoría y experiencia (observación) abriría paso a la cartografía". En 1720 se publicó el primer mapa topográfico de Cataluña, realizado por José Aparicio y grabado por Antonio Sabater, en dos hojas, a una escala de 1:210.000. El primer mapa completo de España fue trazado entre 1739 y 1743 por los jesuitas Carlos Martínez y Claudio de la Vega, en 36 hojas, a una escala de 1:440.000. Pero habría que esperar a la época de fines de siglo para encontrar aportaciones geodésicas de alta precisión, como los planos detallados de nuestras costas realizados por Tofiño. Especial mérito por su esfuerzo, no tanto por sus logros, tiene el *Atlas Geográfico de España* de Tomás López, que trazó más de 200 mapas y trató de "poner de acuerdo" a todos los que entonces existían.

La serie de textos queda completada por el artículo sobre *Observatorios españoles en el siglo XVIII*, de Manuel López Arroyo, actual Director del Observatorio Nacional. El autor dedica la mayor parte de su trabajo a recordarnos la accidentada historia del centro que ahora dirige, y que no disfrutó, pese a los más meritorios esfuerzos, de la mayor fortuna en los siglos pasados. Una serie de circunstancias retrasaron su construcción hasta 1790, aunque el proyecto fue ambicioso: se encargaron los planos al famoso arquitecto Juan de Villanueva (luego hubo que reducir el proyecto por dificultades presupuestarias), y se encargó a William Herschel un telescopio gigante de 23 pies de longitud, dotado de un espejo de 2 pies de diámetro. El centro se inauguró bajo la dirección de don Salvador Jiménez Coronado, que contó con la colaboración, entre otros, de Pedro Alonso de Celanova, experto en eclipses y ocultaciones, y del gran calculista José Chaix.

Pero, como luego había de comentar Gil de Zárate, "sonó la hora de la ruina

cuando se acercaba el instante de su completa organización". La invasión francesa de 1808 provocó la desaparición del observatorio, el telescopio fue robado y los ocupantes convirtieron en astillas (para calentarse) todos los instrumentos. El edificio quedó desmantelado, y los astrónomos que lo servían murieron o fueron a parar al exilio. La reconstrucción fue tardía y lenta.

López Arroyo termina su trabajo con breves referencias a otros observatorios peninsulares, como los de Sevilla y Valencia, y a los ultramarinos de San Cosme en Argentina, Montevideo y Bogotá.

Los trabajos científicos a que acabamos de referirnos vienen seguidos por el catálogo de la exposición, realizado por Lucía Peláez Trémols y Manuel López Menaya, que incluye 148 objetos, relativos a cartas de expediciones, mapas, instrumentos y tratados de la época, algunos del más alto interés. M. López Menaya ha trazado también una breve biografía de los personajes más importantes aludidos en la exposición, y Gregorio Núñez de las Cuevas ha hecho una útil cronología, aunque la reproducción del original se haya realizado, para desgracia del lector, con escasa claridad gráfica.

Una *Bibliografía* cierra el volumen: recoge 108 títulos, no muchos, ciertamente, aunque no por eso la recopilación deja de ser útil. Algunos de ellos son tan elementales y tan apartados del tema de la astronomía y cartografía en el siglo XVIII como el manual de Pío Zabala *España bajo los Borbones*, o la decimonónica obra de vulgarización *Astronomía Popular*, de Camilo Flammarion.

La obra, en su conjunto, es tan variada y dispersa como todas las realizadas por una serie de autores que no trabajan en equipo y carecen de una dirección común. De los cinco artículos que la componen, cuatro relatan, cada cual por su cuenta, las expediciones de Jorge Juan y Antonio de Ulloa; tres nos vienen a decir las mismas cosas sobre Malaspina y dos nos cuentan la triste historia del Observatorio de Madrid. Por fortuna, las colaboraciones, consideradas individualmente, son valiosas y obra de especialistas indiscutibles.

La edición es cuidada por lo que se refiere a la presentación, maquetación, a la calidad del papel, y sobre todo, a las buenas reproducciones en blanco y negro y color; menos en cuanto a la composición tipográfica. Hay errores en muchos nombres propios, y se echa de ver una laguna de texto entre las pág. 18 y 19, no debida, ciertamente, a la pluma del autor. Estas deficiencias, resultado sin duda de una apresurada corrección de última hora, no empecen la calidad científica y la utilidad aportadora de la obra. (J. L. C.)

DISLEXIA. ASPECTOS PSICOLOGICOS Y NEUROLOGIA, por Frank H. Duffy y Norman Geschwind. Editorial Labor; Barcelona, 1988.

El problema de los niños que, teniendo el resto de capacidades intelectuales normales e incluso por encima de la normalidad, presentan una mayor o menor dificultad en el aprendizaje y práctica de la lectura ha preocupado desde antiguo a los pedagogos. Las opiniones al respecto han sido de lo más dispares, yendo desde la pura negación de semejante trastorno aislado hasta su caracterización como alteración específica y definida a la que se dio el nombre de "dislexia".

Sorprendentemente el abordaje de la cuestión desde el punto de vista clínico por parte de pediatras, neurólogos, psiquiatras infantiles, neuropatólogos, etcétera, fue mucho más tardío. Hoy en día se ha establecido ya plenamente la colaboración entre pedagogos y clínicos en el estudio de este problema cuya importancia no necesita destacarse ante el mero dato estadístico de afectar de un 3 a un 6 por ciento de los niños en edad escolar.

En mayo de 1981, el Institute for Child Development Research norteamericano reunió en Filadelfia una serie de especialistas para examinar el tema de la dislexia desde las más diversas ópticas. Las comunicaciones presentadas en aquel simposio sirvieron de base al libro "Dyslexia. A Neuroscientific Approach to Clinical Evaluation", cuya traducción al castellano ha corrido a cargo de un equipo de especialistas bajo la supervisión de J. Elías.

Como suele suceder en los libros con multiplicidad de autores —16 en este caso— una de sus características es la heterogeneidad respecto a la extensión y estructura de los diversos capítulos, ya que cada uno por separado constituye una unidad con entidad propia. No obstante, el denominador común de todos ellos, de acuerdo con el título original del libro, es la aportación de datos neurocientíficos que faciliten la valoración clínica del niño disléxico.

A lo largo de los once capítulos, los diversos autores exponen sus trabajos fundados en datos clínicos, electroencefalográficos, histoquímicos o anatomopatológicos que permitan detectar alguna alteración responsable del defecto en la lectura. Si bien en muchos casos se ha conseguido demostrar —en gran parte merced a la aplicación de modernos métodos de exploración neurológica (cartografía de la actividad eléctrica cerebral con potenciales evocados y tomografía axial computarizada, por ejemplo)— alteraciones que se repiten significativamente en los niños disléxicos, la correspondencia entre tales alteraciones y la presencia de la dislexia dista de ser unívoca. Esto habla en favor de que la dislexia más que una entidad nosológica es un síntoma que reconoce una pluralidad de causas, conocidas o no. En todo caso, estos hallazgos tienen un gran valor para perfilar la ya antigua clasificación de las dislexias en "adquiridas" y "del desarrollo" y, en consecuencia, proporcionar datos útiles para decidir una actitud terapéutica con el máximo fundamento científico posible en el estadio actual de nuestros conocimientos.

Un valor no escaso del libro es dejar perfiladas líneas futuras de investigación, de las que hay que esperar importantes avances en el conocimiento de este trastorno, lo que resulta particularmente útil para quienes estén interesados en contribuir con sus trabajos, tanto desde la perspectiva clínica y psicológica como desde la pedagógica, en este amplio campo donde quedan tantos puntos por aclarar.

El libro, de un gran rigor científico avalado por la personalidad y el prestigio de sus autores, proporciona información de primera mano de gran valor para neurólogos, pediatras, psicólogos y, en general, todos aquellos profesionales —y los estudiantes respectivos— cuyo campo de acción sea el niño en edad escolar.

Finalmente digamos que la obra tiene carácter póstumo para dos de sus autores: el doctor Norman Geschwind, que fue profesor de Psicología y de Ciencias y Tecnología de la Salud en el prestigioso Instituto de Tecnología de Massachusetts, y que en el libro se encarga de los capítulos inicial y final dedicados respectivamente a "La dislexia en la perspectiva neurológica" y a los "Fundamentos biológicos de la lectura", y la doctora Rita Rudel, profesora de Psicología médica en el Columbia College of Physicians and Surgeons, que escribió el capítulo sobre "La definición de dislexia: defectos motores y del lenguaje". Ambos eran personalidades bien conocidas internacionalmente en el campo de la neurología y de las ciencias de la conducta que, con sus aportaciones en el presente libro, ven inesperadamente interrumpida su labor científica. (F. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL ORNITORRINCO

THE BIOLOGY OF THE MONOTREMES. Mervyn Griffiths. Academic Press, Inc., 1978.

THE PLATYPUS. Tom Grant. New South Wales University Press, 1984.

FIRST MESOZOIC MAMMAL FROM AUSTRALIA—AN EARLY CRETACEOUS MONOTREME. Michael Archer, Timothy F. Flannery, Alex Ritchie y R. E. Molnar en *Nature*, vol. 318, n.° 6044, págs. 363-366; 1985.

THE ORIGIN OF EGG-LAYING MAMMALS. Zofia Kielan-Jaworowska, A. W. Crompton y Farish A. Jenkins, Jr., en *Nature*, vol. 326, n.° 6116, págs. 871-873; 30 de abril de 1987.

LUZ COMPRIMIDA

SQUEEZED LIGHT. Bernard Yurke y Richart E. Slusher en *Optics News*, vol. 13, n.° 6, págs. 6-9; junio, 1987.

PRECISION MEASUREMENT BEYOND THE SHOT-NOISE LIMIT. Min Xiao, Ling-An Wu y H. J. Kimble en *Physical Review Letters*, vol. 59, n.° 3, págs. 278-281; 20 de julio de 1987.

SQUEEZED STATES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD. *Journal of the Optical Society of America B,* vol. 4, n.° 10; octubre, 1987.

SQUEEZED-LIGHT-ENHANCED POLARIZATION INTERFEROMETER, P. Grangier, R. E. Slusher, B. Yurke y A. LaPorta, en *Physical Review Letters*, vol. 59, n.° 19, págs. 2153-2156; 9 de noviembre de 1987.

EL FACTOR DE NECROSIS TUMORAL

TUMOR NECROSIS FACTOR (TNF). Lloyd J. Old en *Science*, vol. 230, n.° 4726, págs. 630-632; 1985.

TUMOR NECROSIS FACTOR AND RELATED CYTOTOXINS. Dirigido por Gregory Bock y Joan Marsh. John Wiley & Sons, Inc., 1987.

SECRETORY PRODUCTS OF MACROPHAGES. Carl F. Nathan en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 79, n.° 2, págs. 319-326; febrero, 1987.

TUMOR NECROSIS FACTOR/CACHECTIN AND RELATED CYTOKINES. Dirigido por Benjamin Bonavida, George E. Gifford, Holger Kirchner y Lloyd J. Old. S. Karger AG, Basilea. En prensa.

INVERSIONES MAGNETICAS Y DINAMO TERRESTRE

THE EARTH'S MAGNETIC FIELD: ITS HISTORY, ORIGIN AND PLANETARY PERSPECTIVE. Dirigido por Ronald T. Merrill y Michael W. McElhinny. Academic Press, Inc., 1983.

REVERSALS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD. J. A. Jacobs. Adam Hilger, Ltd., 1984.

HOW THE GEOMAGNETIC FIELD VECTOR REVERSES POLARITY. Michel Prévot, Edward A. Mankinen, C. Sherman Grommé y Robert S. Coe en *Nature*, vol. 316, n.° 6025, págs. 230-234; 18 de julio de 1985.

MECHANISM FOR GEOMAGNETIC POLARITY REVERSALS. David Gubbins en *Nature*, vol. 326, n.° 6109, págs. 167-169; 12 de marzo de 1987.

SEQUENTIAL GEOMAGNETIC REVERSALS RECORDED IN UPPER TORTONIAN MARINE CLAYS IN WESTERN CRETE (GREECE). Jean-Pierre Valet, Carlo Laj y Cornelis G. Langereis en *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n.° B2, págs. 1131-1151; 10 de febrero de 1988.

INTERACCION DE LA RADIACION LASER CON LOS MATERIALES

FREQUENCY DOMAIN OPTICAL STORAGE AND OTHER APPLICATIONS OF PERSISTENT SPECTRAL HOLE-BURNING, CHAPTER 7 OF PERSISTENT SPECTRAL HOLE-BURNING: SCIENCE AND APPLICATIONS. Dirigido por W. E. Moerner en *Topics in Current Physics*, vol. 44, págs. 251-307. Springer; 1988.

BEAM SOLID INTERACTIONS AND TRANSIENTS MATERIALS. Dirigido por M. O. Thompson, S. Thomas y J. S. Williams en *MRS Symposium Proc.* vol. 74; 1986.

THE HIGH TECHNOLOGY CUTTING MACHINE MARKET. Report 871, Strategic Research Center, 1988.

EXCIMER LASERS ADAPT TO ANGIOPLASTY. J. B. Landerslager en *Laser Focus*, vol. 5; 1988.

AEROGELES

INTRODUCTION TO PERCOLATION THEORY. Dietrich Stauffer. Taylor & Francis, 1985.

AEROGELS. Dirigido por J. Fricke. Springer-Verlag, 1986.

ON GROWTH AND FORM: FRACTAL AND NON-FRACTAL PATTERNS IN PHYSICS. Dirigido por H. Eugene Stanley y Nicole Ostrowsky. Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

EL OSARIO DEL ESTRECHO DE INDIAN

THE ARCHAEOLOGY OF NEW ENGLAND. Dean R. Snow. Academic Press, Inc., 1980.

METHOD AND THEORY IN COASTAL NEW YORK ARCHAEOLOGY: PARADIGMS OF SETTLEMENT PATTERN. Lynn Ceci en *North American Archaeologist*, vol. 3, n.° 1, págs. 5-36; 1982.

CHANGING VIEWS OF ABORIGINAL SEASONALITY AND SETTLEMENT IN THE GULF OF MAINE. David Sanger en *Canadian Journal of Anthropology/Revue Canadienne d'Anthropologie*, vol. 2, n.° 2, págs. 195-203; Spring, 1982.

HISTORIC AND ARCHAEOLOGICAL RESOURCES OF CAPE COD AND THE ISLANDS. Massachusetts Historical Commission, Boston, 1987.

EL MISTERIO DE LA CONSTANTE COSMOLOGICA

EXPANDING UNIVERSES. Erwin Schrodinger. Cambridge University Press, 1956.

THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF SPACE-TIME. S. W. Hawking y G. F. R. Ellis. Cambridge University Press, 1973.

THE ACCIDENTAL UNIVERSE, P. C. W. DAVIES. Cambridge University Press, 1982.

SUTIL ES EL SEÑOR... LA CIENCIA Y LA VIDA DE ALBERT EINSTEIN. Abraham Pais. Edit. Ariel; Barcelona, 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

A CATALOG OF SPECIAL PLANE CURVES. J. Dennis Lawrence. Dover Publications, Inc., 1972.

TALLER Y LABORATORIO

ARE ICICLES SINGLE CRYSTALS? R. A. Laudise y R. L. Barns en *Journal of Crystal Growth*, vol. 46, n.° 3, págs. 379-386; marzo, 1979.

ICICLES AS CRYSTALLIZATION PHENOMENA. Charles A. Knight en *Journal of Crystal Growth*, vol. 49, n.° 1, págs. 193-198; mayo, 1980.

THE NOT-SO-ORDINARY ICICLE. Ira W. Geer en *Weatherwise*, vol. 34, n.° 6, págs. 257-259; diciembre, 1981.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL CRECIMIENTO ECONOMICO DE ESTADOS UNIDOS, por Ralph Landau
Aumentaría si se mejorara la capacitación de los trabajadores, se incrementara el apoyo a la investigación y el desarrollo y se animara las inversiones que supongan un fomento de las innovaciones técnicas.

VERIFICACION DE LA TEORIA COSMOLOGIGA, por David N. Schramm y Gary Steigman
¿Tiene límite el número de familias de partículas elementales? Los restos de la gran explosión que dio origen al universo sugieren que así es y los aceleradores se están aproximando a las energías requeridas para confirmarlo.

PEROVSQUITAS, por Robert M. Hazen
Muchos de los nuevos superconductores a alta temperatura son perovsquitas, una familia de cerámicas. De su adaptable estructura derivan materiales que exhiben un amplio abanico de propiedades eléctricas.

LAS BACTERIAS, ORGANISMOS PLURICELULARES, por James A. Shapiro
Se diferencian en diversos tipos celulares y configuran colonias muy regulares, que parecen estar dirigidas por sistemas de control temporal y espacial de gran complejidad.

NEUROBIOLOGIA DE LA ALIMENTACION DE LAS SANGUIJUELAS, por Charles M. Lent y Michael H. Dickinson
Un solo neurotransmisor, la serotonina, orquesta la conducta alimentaria de la sanguijuela de uso en medicina. El descubrimiento podría iluminar cómo controlan esos mensajeros químicos el comportamiento de otros animales.

POLIÑAS DEL OCEANO AUSTRAL, por Arnold L. Gordon y Josefino C. Comiso
Vastísimos huecos del hielo que rodea la Antártida, exponen enormes áreas de agua marina al aire gélido, colaborando así a impulsar la máquina de calor que engarza el océano con la atmósfera.

FUNDICION PRIMITIVA DE HIERRO EN AFRICA CENTRAL, por Francis Van Noten y Jan Raymaekers
Hace más de 2500 años, pueblos próximos al lago Victoria fundían hierro en altos hornos que alcanzaban temperaturas notablemente elevadas. Los autores descubren el procedimiento en que se fundaba esa antigua técnica.

ACTIVACION DE LOS ONCOGENES POR RADIACION Y AGENTES QUIMICOS, por Javier León, Isabel Guerrero y Angel Pellicer
El diseño de modelos de carcinogénesis animal que reproducen la activación de ciertos oncogenes permitirá estudiar el proceso por el que un carcinógeno desencadena la formación de un tumor.

